

VŠB - Technická univerzita Ostrava
Univerzitní studijní programy

**Analýza lambda regulace u zážehových spalovacích motoru s
dvěma a více kyslíkovými sondami**

**Analysis of Lambda Regulation by Petrol Combustion Engines
with Two and More Oxygen Sensors**

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci *Analýza lambda regulace u zážehových spalovacích motorů s dvěma a více kyslíkovými sondami* vypracoval samostatně pod vedením Ing. Petra Šimoníka, Ph.D. a uvedl v seznamu literatury všechny použité literární prameny a publikace, ze kterých jsem čerpal.

V Ostravě dne 20. května

vlastnoruční podpis autora

Poděkování

Na tomto místě bych rád poděkoval Ing. Petru Šimoníkovi, Ph.D. za cenné připomínky a odborné rady, kterými přispěl k vypracování této bakalářské práce.

Abstrakt

Bakalářská práce se zabývá analýzou lambda regulace u zážehových spalovacích motorů. V rámci řešení bakalářské práce byla provedena celá řada laboratorních testů k ověření funkce lambda regulace u automobilu se zážehovým motorem. Testy byly provedeny pomocí sériové diagnostiky, paralelní diagnostiky a analyzátoru emisí. První část je zaměřena na teoretickou rešerši z oblasti lambda regulace, popis jednotlivých lambda sond a řízení palivové směsi. Druhá část se věnuje praktickému měření, které má za úkol ověřit teoretické poznatky o lambda regulaci. Třetí část je zaměřením na vytvoření laboratorní úlohy pro pochopení a ověření funkčnosti lambda regulace při laboratorní výuce předmětu Automobilová elektronika.

Abstrakt

The bachelor thesis deals with analysis of the lambda regulation by petrol combustion engines. Within solution of this thesis the numbers of laboratory tests were performed to verify function of the lambda regulation. The tests were done by serial diagnostic, parallel diagnosis and an analyzer of emissions. The first part is focused on the search in the field of lambda regulation, description of each oxygen sensors and the use of fuel mixtures. The second part is focused on practical measurements, which have the goal of seeing if theoretical knowledge is right in lambda regulation. The third part is focused on developing a laboratory task for an understanding and verification of the lambda regulation function by laboratory classwork in subject Automotive electronics.

Klíčová slova

Lambda regulace, emise, lambda sonda, uzavřená regulační smyčka

Key words

Lambda reregulation, emissions, oxygen sensor, close loop

Seznam použitých zkratk a symbolů:

$C_L(n)$	[1]	korekční faktor pro uzavřenou regulační smyčku
CO		oxid uhelnatý
EGR		systém pro zpětné nasávání spalin
F	[kg]	množství vstřikovaného paliva
HC		nespálené uhlovodíky
$I(n)$	[1]	integrační část korekce
I/O		subsystém vstupů/výstupů
I_p		přečerpávající článek
I_{PR}	[mA]	přečerpávající proud
N	[1]	počet válců
NO _x		oxid dusíku
n_M	[min ⁻¹]	otáčky za minutu
PKH/OKH		snímač otáček motoru a pozice klikové hřídele
PV	[kg·s ⁻¹]	množství nasátého vzduchu
$P(n)$	[1]	proporcionální část korekce
R_f	[kg·s ⁻¹]	koeficient pro dodávku paliva
ŘNV		řídící napětí ventilu
SDTS		snímač diferenciálního tlaku
SHV		snímač hmotnosti vzduchu
SPSK		snímač pozice škrtící klapky
STChK		snímač teploty chladicí kapaliny
T	[s]	doba vstřikovacího impulsu
TCK		třícestný katalyzátor
T_b	[s]	základní doba vstřikovacího impulsu
$T_b(n)$	[s]	n -tá doba vstřikovacího impulsu
U_o	[mV]	výstupní napětí dvoubodové lambda sondy
V	[kg]	množství vzduchu nasátého do válce
V_s		měřící článek
VV		vstřikovače paliva
V/P_D	[1]	poměr vzduch/palivo
r	[s ⁻¹]	otáčky za sekundu
α	[1]	konstanta pro výpočet korekčního faktoru
β	[1]	konstanta pro výpočet korekčního faktoru
λ	[1]	součinitel přebytku vzduchu

Obsah

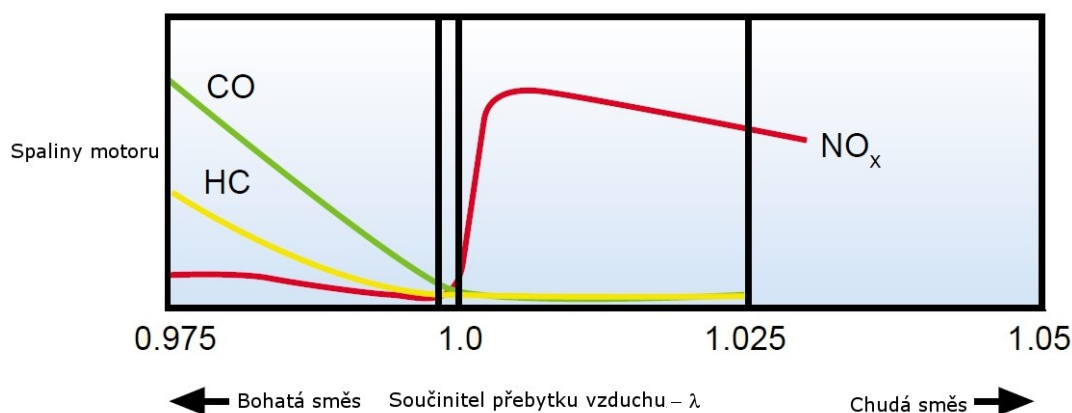
OBSAH.....	7
1. POPIS LAMBDA REGULACE.....	8
1.1. POJEM LAMBDA SONDA, LAMBDA REGULACE.....	8
1.2. DRUHY LAMBDA SOND.....	10
1.2.1.DVOUBODOVÉ LAMBDA SONDY.....	12
1.2.2.ŠIROKOPÁSMOVÁ LAMBDA SONDA.....	16
1.3. ŘÍZENÍ PALIVOVÉ SMĚSI.....	18
1.3.1.STARTOVÁNÍ.....	19
1.3.2.ZAHŘÍVÁNÍ.....	20
1.3.3.OTEVŘENÁ REGULAČNÍ SMYČKA.....	21
1.3.4.UZAVŘENÁ REGULAČNÍ SMYČKA.....	21
1.3.5.PRUDKÉ ZRYCHLENÍ.....	23
1.3.6.DECELERACE.....	23
2. MĚŘENÍ PRO ANALÝZU LAMBDA REGULACE.....	24
2.1. PRŮBĚH NEZAHŘÁTÉ LAMBDA SONDY	24
2.2. OVLIVNĚNÍ VSTŘIKU LAMBDA SONDOU.....	25
2.2.1.PŘIPOJENÁ LAMBDA SONDA PŘED KATALYZÁTOREM.....	27
2.2.2.ODPOJENÁ LAMBDA SONDA ZA KATALYZÁTOREM.....	32
3. ZÁVĚR.....	35
4. SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY.....	36
5. SEZNAM PŘÍLOH.....	37

1. Popis lambda regulace

1.1. Lambda sonda, Lambda regulace

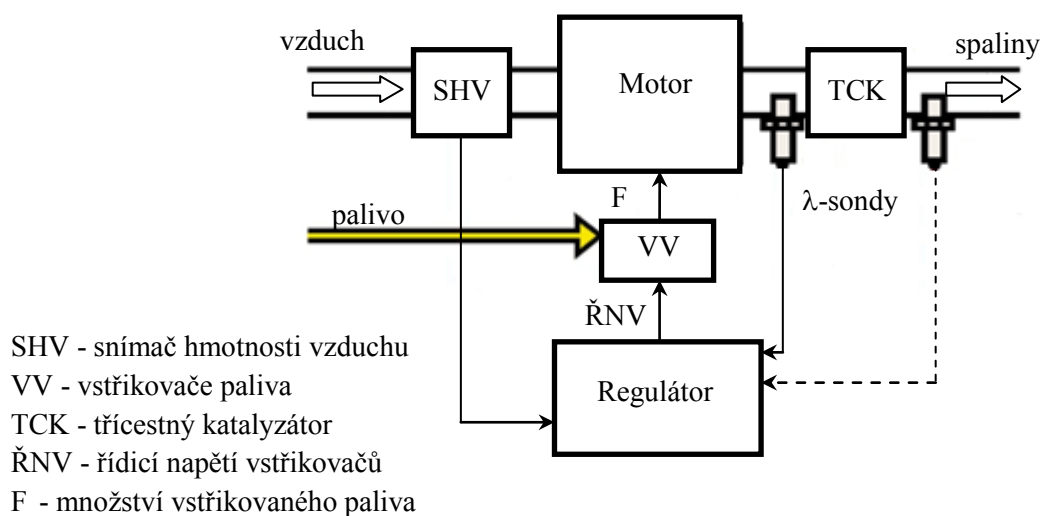
Při spalování paliva je produkována řada neškodných látek - jako je voda, oxid uhličitý a dusík, stejně jako mnoho nebezpečných látek a vzhledem ke stálému nárůstu nároků na snížení spotřeby paliva a ekologii silničního provozu přišla firma BOSCH, v roce 1976, do automobilového průmyslu s lambda sondou neboli s kyslíkovým senzorem. [1]

Lambda sondy jsou v dnešní době povinné a jsou nedílnou součástí výfukového potrubí s třicestným katalyzátorem. Třicestný katalyzátor dokáže snížit emise znečišťujících látek (HC, CO, NO_x) až o 98%, za předpokladu, že motor působí ve velmi úzkém rozmezí ($\lambda = 0,98$ až $1,02$) na střed kolem stechiometrického poměru. Stechiometrický poměr je optimální složení palivové směsi pro spalování, které je 14,7 kg vzduchu na 1 l paliva a tomu odpovídá součinitel přebytku vzduchu $\lambda = 1$. Abychom toho dosáhli, potřebujeme, aby lambda sonda měřila obsah kyslíku ve výfukovém potrubí a podle obsahu kyslíku, ve spalínách, řídící jednotka upravuje složení směsi. Katalyzátor pak přeměňuje škodlivé složky, HC, CO, NO_x, na vodní páru, oxid uhličitý a dusík. Z důvodu dosažení co nejnižší spotřeby, se výrobci snaží využívat, co možná nejchudší směs i za cenu vzniku zvýšeného množství oxidu dusíku NO_x (obr. 1). [2]



Obr. 1 Složení spalin po průchodu katalyzátorem [2]

Dnešní vozy jsou standardně vybaveny nejméně dvěma lambda sondami. A to před katalyzátorem, který slouží jako regulační a za katalyzátorem, pro kontrolu správné funkce lambda regulace. Lambda sonda před katalyzátorem přenáší napětí do řídící jednotky motoru, která podle toho rozpozná, jestli se jedná o chudou ($\lambda > 1$) nebo bohatou ($\lambda < 1$) směs. Na základě této informace vydá řídící jednotka příkaz pro systém vstřikování, buď obohatit nebo ochudit směs. Tato regulace se opakuje v uzavřené regulační smyčce (obr. 2). Pokud by motor spaloval příliš chudou směs, tak se zvýší obsah oxidu dusíku (NO_x). Naopak, při bohaté směsi se zvyšuje obsah oxidu uhlíku (CO) a nespálených uhlovodíků (HC) (Obr. 1). [2]



Obr. 2 Základní schéma lambda regulace[2]

Historie lambda sondy - BOSCH

1976 – První regulace výfukových plynů

Prostřednictvím vývoje lambda sondy se stávají katalyzátory mnohem účinnější a méně poruchové. Tím dochází ke snížení emisí o 50%. Interval výměny lambda sondy je 50 – 80 tis. km.

1985 – Vyhřívané lambda sondy

Lambda sonda již nemusí být montována v přímé blízkosti motoru. Zahřívání umožňuje udržet pro snímač teplotu vyšší než 350 °C. Interval výměny lambda sondy je 100 – 160 tis. km. V létě téhož roku je lambda sonda rozšířena o čtvrtý vodič a umožňuje jednodušší kontrolu přístroje. Snadnější je nyní i rozpoznání případné poruchy lambda sondy. Interval výměny lambda sondy je 160 tis. km.

1990 – Rychlejší dosažení teploty

Planární lambda sonda s vícevrstevnými keramickými fóliemi se zahřeje na provozní teplotu dvakrát rychleji. To sníží emise v dříve kritické fázi studeného startu o dalších 50%. Interval výměny lambda sondy je 160 tis. km.

1999 – Pro benzín, naftu a plyn

Z důvodů ještě přesnějších měření výfukových plynů jsou nyní k dispozici 2 měřicí články a 6 pólů. Pomocí planárních širokopásmových lambda sond je poprvé možné regulovat a řídit i plynové a dieselové motory. Interval výměny lambda sondy je 160 tis. km.

2002 – Univerzální program

Moderní motorová vozidla potřebují pro optimální chod a nízké emise i více, než jednu lambda sondu, mezi motorem a výfukem. Společnost BOSCH vyvinula univerzální lambda sondy a konektory. Interval výměny lambda sondy je 160 tis. km. [3]

1.2. Druhy Lambda sond

Rozdělení lambda sond

Dvoubodové lambda sondy

- Nevyhřívané
 - Prstencový typ
 - 1 vodič
 - 2 vodiče
- Vyhřívané
 - Prstencový typ
 - 3 vodiče
 - 4 vodiče
 - Planární typ
 - 4 vodiče

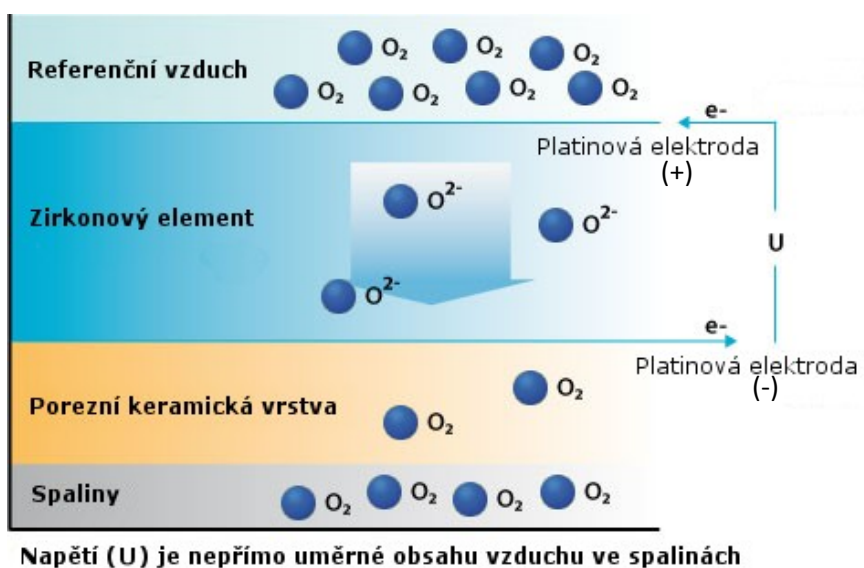
Širokopásmové lambda sondy

- Vyhřívané
 - Planární typ
 - 5 vodičů

1.2.1. Dvoubodové lambda sondy

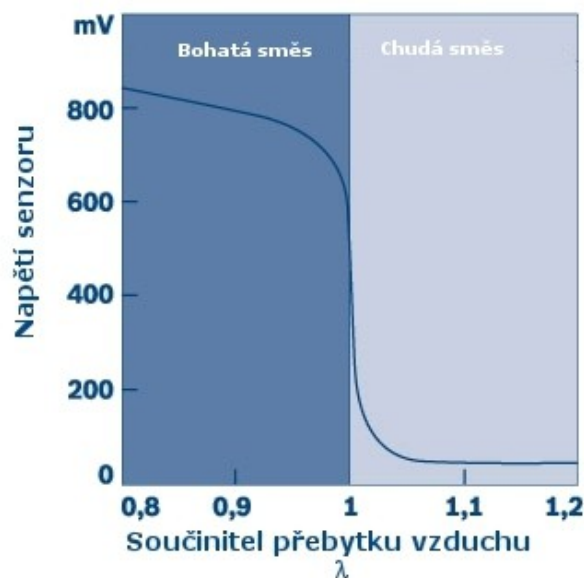
Princip činnosti

Dvoubodová lambda sonda pracuje na principu galvanického článku, který reaguje na obsah kyslíku ve spalínách. Základem sondy je pevný elektrolyt s oxidu Zirkoničitého (ZrO_2) stabilizovaný oxidem oxid Yttritým Y_2O_3 . Při zahřátí elektrolytu nad 350°C se stává vodivým pro ionty kyslíku. Elektrolyt má prstencový tvar a je umístěn vnější stranou do spalovacího potrubí, kde je v kontaktu se spalínami a vnitřní strana je v kontaktu s referenčním vzduchem. Obě strany elektrolytu jsou pokryty tenkou, porézní vrstvou platiny, ty slouží jako elektrody (obr. 3) a na vnější straně má ochranou porézní keramickou vrstvu, o síle pavučiny, která ji chrání před spalínami a navíc je ještě chráněna ochrannou trubicí proti mechanickému poškození a teplotním rázům. Vzhledem k tomu, že na straně spalín je nižší obsah kyslíku než na straně referenčního vzduchu, tak zde vznikne rozdíl potenciálu (napětí) a nerovnováhu se snaží vykompenzovat tím, že kyslík s referenčního vzduchu se redukuje na vnitřní platinové elektrodě na ionty, putuje přes keramický element a nakonec zase oxiduje na kyslík na vnější platinové elektrodě. Čím větší je rozdíl obsahu kyslíku mezi referenčním vzduchem a spalínami, tím větší je napětí na elektrodách. Pohyb iontů je znázorněn na obrázku 3. [4]



Obr. 3 Průřez keramickým elementem [5]

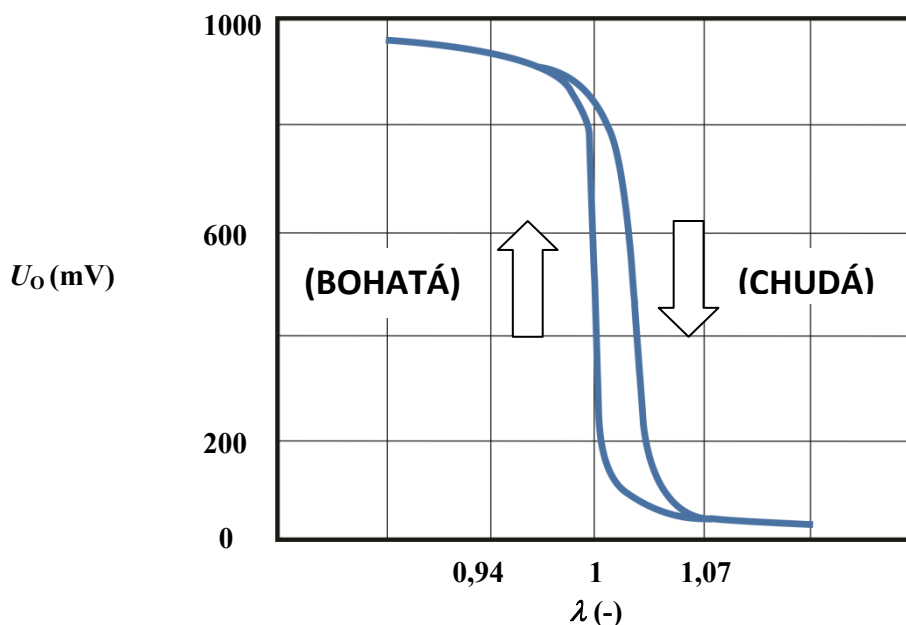
Chudé směsi odpovídá napětí 0,1 V, bohaté směsi napětí 0,9 V a stechiometrickému poměru odpovídá skoková oblast mezi 0,2 až 0,8 V. Závislost je zobrazena na obrázku 4. [2]



Obr. 4 Napětí senzoru [6]

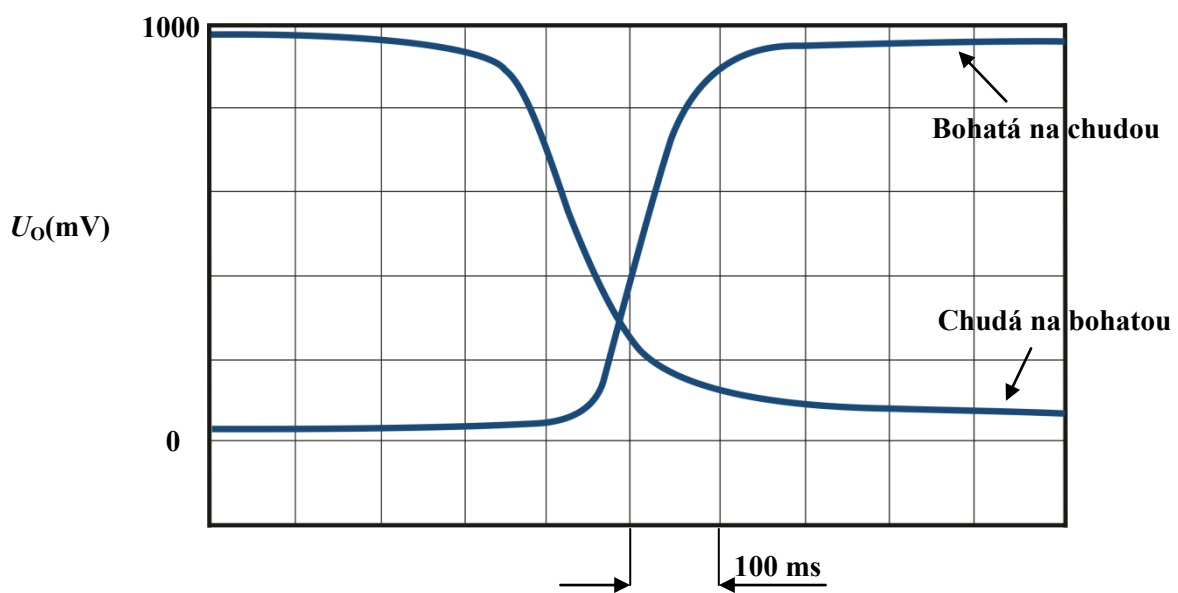
Napětí senzoru se nemění pořád stejně (obr. 5). Tyto data byla získána pomalu měněním poměru vzduch/palivo po celé stechiometrii. Šipka směrem dolů ukazuje změnu napětí U_0 , když poměr vzduch/palivo byl měněn s bohaté na chudou směs. Šipka nahoru ukazuje změnu napětí U_0 při změně

poměru vzduch/palivo s chudé na bohatou. Jak je jasně vidět na obrázku 5, tak změna výstupu dvoubodové lambda sondy není stejné pro zvýšení poměru vzduch/palivo a pro snížení poměru vzduch/palivo. Tento jev se nazývá hystereze. [9]

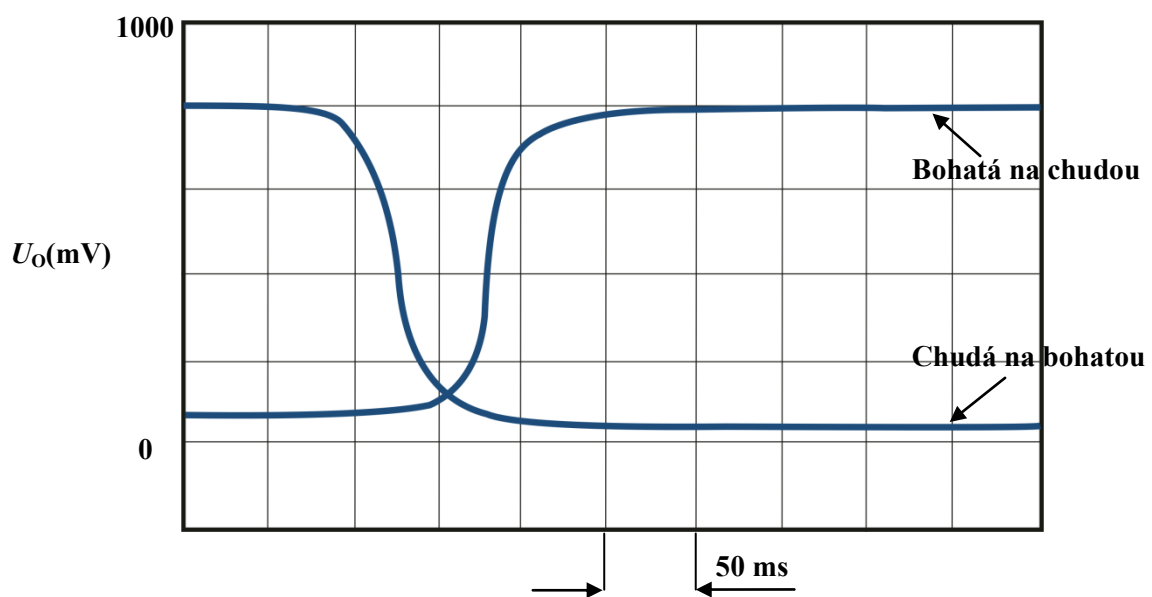


Obr. 5 Hystereze dvoubodové lambda sondy[9]

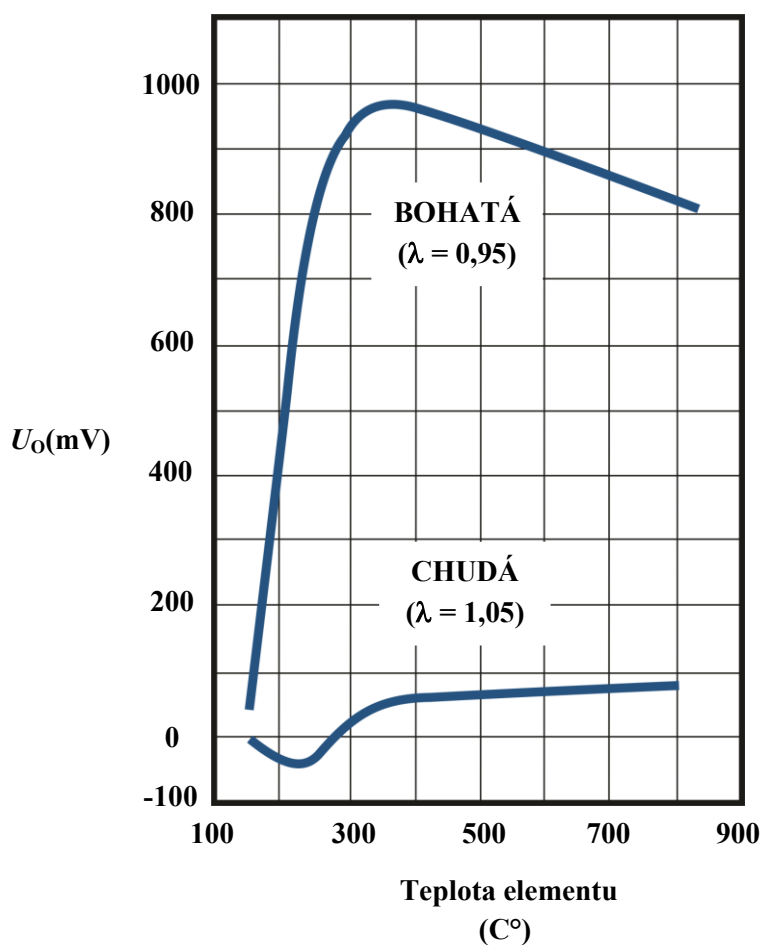
Teplota ovlivňuje, jak čas přechodu, tak napětí senzoru. Čas přechodu je znázorněn na obrázcích 6 a 7. Na obrázcích je čas na dílek dvakrát tak větší, při 800 °C než při 350 °C. To znamená, že doba přechodu je při 350 °C zhruba 0,1 sekundy, zatímco při 800 °C to je 0,05 sekund. To je poměr 2:1 pro dobu přechodu při změně teploty. Teplotní závislost výstupního napětí dvoubodové lambda sondy je velmi důležitá. Na obrázku 8 je znázorněna teplotní závislost bohaté a chudé směsi na výstupním napětí U_O při zatížení 5 M Ω . Výstupní napětí je pro bohatou směs v rozmezí 0,80 V až 1 V, při teplotě výfukových plynů mezi 350 °C a 800 °C. Pro chudou směs je výstupní napětí zhruba v rozmezí 0,05 V až 0,07 V pro stejný teplotní rozsah. [9]



Obr. 6 Doba přechodu při 350 °C [9]



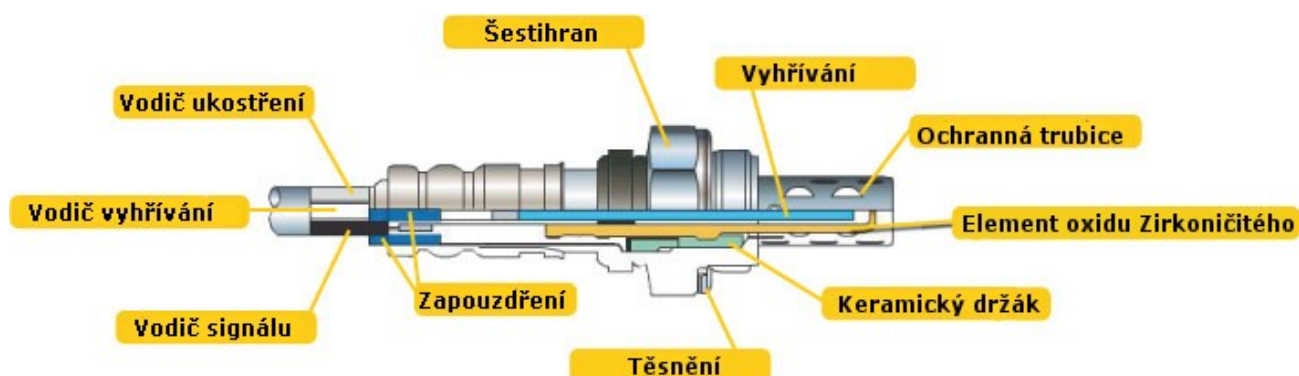
Obr. 7 Doba přechodu při 800 °C [9]



Obr. 8 Závislost teploty na výstupním napětí U_o [9]

Prstencový typ

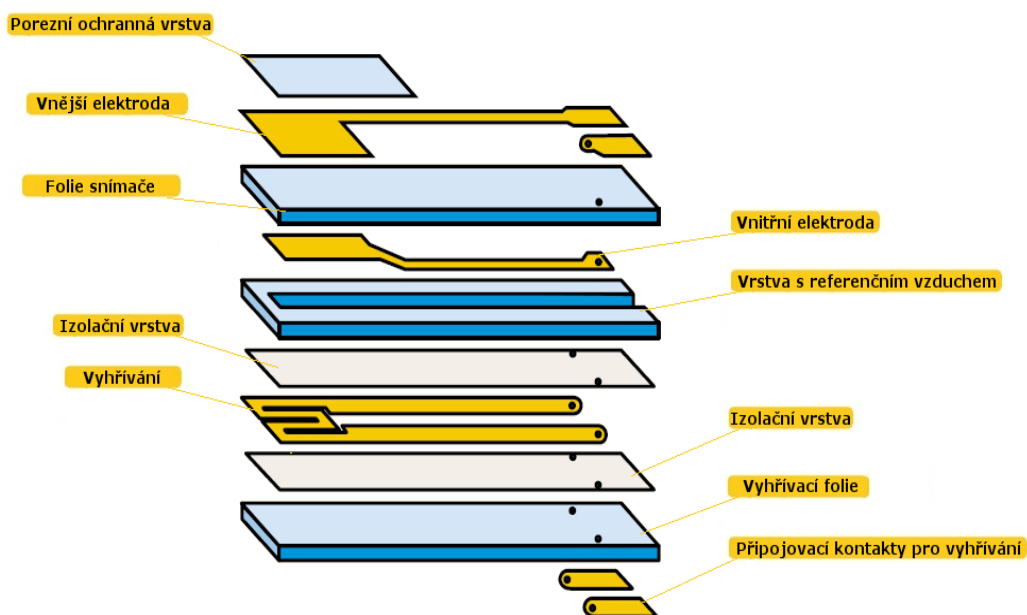
Jádrem této sondy je dutý, prstencový, keramický element. Element je chráněn ochranou trubicí. Ochranná trubice je navržena tak aby měl element kontakt se spaliny a zároveň chrání element před mechanickým poškozením od pevných částí. Důležité je, že také chrání keramický element před kontaktem s vodní parou, která může být obsažena ve výfukovém potrubí. Vodní pára by při kontaktu s elementem zkondenzovala a vzniklý tepelný šok by poškodil sondu. Tento element se stává vodivým pro ionty kyslíku při 350 °C, zastaralá konstrukce spočívala, že senzor vyhřeje výfukové plyny. Dalším důležitým prvkem je vyhřívání. Zastaralé typy sond neobsahují vyhřívání, a proto musejí být umístěny co nejbližší k výfukovému ventilu, což snižuje jejich životnost. Navíc použitelný signál byly schopny poskytnout až po minutě provozu. To způsobovalo větší spotřebu paliva a zhoršení emisí. Dnešní prstencové lambda sondy jsou vybaveny vyhříváním. To je umístěno uvnitř sondy. Hlavním plusem vyhřívání je, že lambda sonda dokáže dát použitelný signál nejpozději do 30 sekund a nemusí být umístěna co nejbližší výfukovému ventilu, to výrazně zvyšuje její životnost. Na obr. 9 je ukázka vyhřívání lambda sondy. [7]



Obr. 9 Vyhříváná prstencová lambda sonda [7]

Planární typ

Planární sonda odpovídá funkčně prstencovým vyhříváným sondám. Pevný elektrolyt se skládá z jednotlivých, na sebe, laminovaných foliích (Obr. 10). Planární keramický prvek (měřící článěk a vyhřívání) má tvar protáhlé destičky s obdélníkovým průřezem. Povrch měřícího článku je opatřen mikroporézní vrstvou z ušlechtilého kovu. Ta je na straně vystavené spalínám navíc zakrytá porézní keramickou ochrannou vrstvou. Ta zabraňuje erozivnímu poškození, kvůli zbytku obsažených ve spalínách. Vyhřívací prvek se skládá z meandru z ušlechtilého kovu, který je izolovaně integrován do keramických destiček a zajišťuje rychlé zahřátí. Navíc konstrukce planární lambda sondy umožňuje použít dvojitou ochrannou trubici, která ještě lépe chrání element před mechanickým poškozením a teplotními rázy. Konstrukce lambda sondy je podobná jako u vyhříváné prstencové sondy, s tím rozdílem, že vyhřívání a element oxidu zirkoničitého jsou integrovány do planárního keramického prvku (Obr. 10). [8]



Obr. 10 Složení planárního elementu [2]

Na obrázku 11 je popsáno barevné rozlišení kabelů u dvoubodových lambda sond.

Nevyhřívané		Vyhřívané	
1 Kabel	2 Kabely	3 Kabely	4 Kabely
Černý = Signál	Černý = Signál	Černý = Signál	Černý = Signál
	Šedý = Ukostření	2xBílý = Vyhřívavý element	Šedý = Ukostření
			2xBílý = Vyhřívavý element

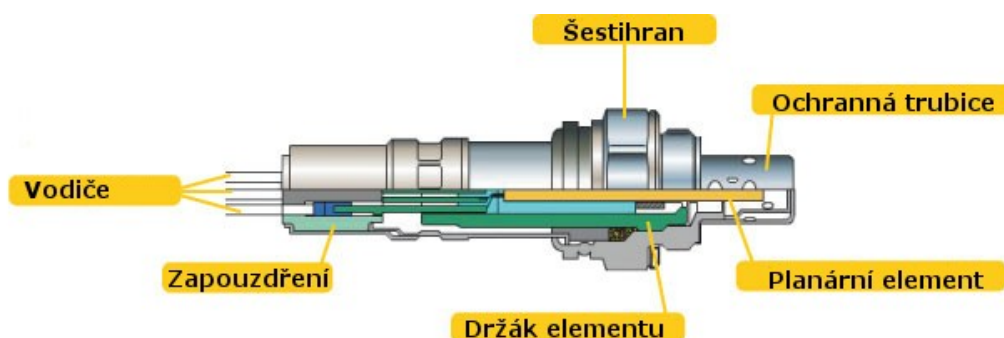
Obr. 11 Barevné rozdělení kabelů u dvoubodových sond [5]

1.2.2. Širokopásmová lambda sonda

Pomocí širokopásmové lambda sondy je možno v širokém rozsahu určovat koncentraci kyslíku ve spalínách a z toho usuzovat poměr vzduch/palivo ve spalovacím prostoru. Širokopásmové lambda sondy dokáží měřit nejen ve stechiometrickém bodu při $\lambda = 1$, ale také v oblasti bohaté a chudé směsi. Dodávají v rozsahu $0,7 < \lambda < \infty$ (∞ = vzduch s 21 % O₂) jednoznačný, spojitý elektrický signál. [8]

Díky těmto vlastnostem se širokopásmová lambda sonda nepoužívá jen u systému řízení motoru s dvoubodovou regulací ($\lambda = 1$), ale také u koncepcí regulace, pracující s chudou a bohatou směsí paliva se vzduchem. Hodí se ale také pro lambda regulaci zážehových motorů s chudou koncepcí regulace, vznětových motorů, plynových motorů a plynových topidel. [8]

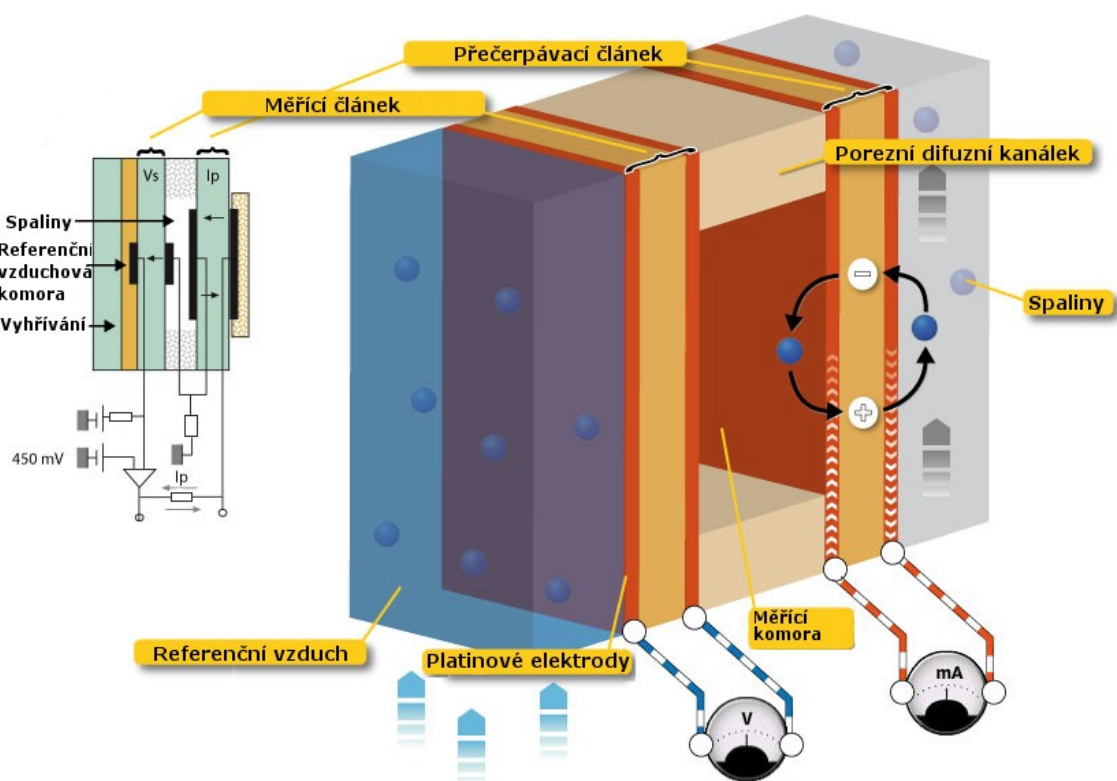
Konstrukce sondy se velice podobá dvoubodové planární lambda sondě, která obsahuje dvojistou ochrannou trubici a hlavní rozdíl je v konstrukci planárního elementu, ten je sám o sobě regulován elektrickým obvodem, proto se musí širokopásmová lambda sonda měnit celá i s vodiči a konektorem. Na obrázku 15 je popsáno barevné rozdělení kabelů.



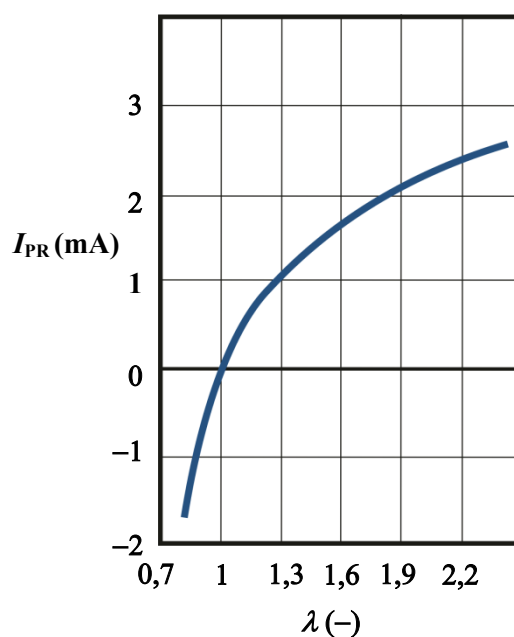
Obr. 12 Širokopásmová lambda sonda [10]

Princip činnosti

Širokopásmová lambda sonda je planární, dvoučláneková sonda, využívající princip mezního proudu. Její měřicí článek je vyroben s keramiky (ZrO_2 stabilizovaný Y_2O_3) a plní stejnou funkci jako u dvoubodové lambda sondy. Druhý článek je přečerpávací, ten přečerpává ionty kyslíku. Oba články jsou vůči sobě umístěny tak, že mezi nimi vznikne měřicí komora široká přibližně 10 až 50 μm . Měřicí komora je přístupná pro spaliny přes porézní difuzní kanálek. Měřicí článek je na jedné straně spojen s referenční vzduchovou komorou a na druhé straně je vystaven spalínám v měřicí komoře. Na obrázku 12 je znázorněno složení planárního elementu. Pro nastavení součinitele přebytku vzduchu λ v měřicí komoře, porovnává měřicí článek plyn v měřicí komoře s referenčním vzduchem, v referenční vzduchové komoře. Při přivedení čerpacího proudu na platinové elektrody čerpacího článku, může být kyslík přečerpáván ven nebo do měřicí komůrky. Pomocí napětí měřicího článku se reguluje čerpací proud pro čerpací článek tak, aby v měřicí komoře měl plyn konstantní složení se součinitelem přebytku vzduchu $\lambda = 1$. Při chudých spalínách čerpá čerpací článek kyslík ven (kladný čerpací proud). Při bohatých spalínách se kyslík naopak (katalytickým rozkladem CO_2 a H_2O na elektrodě vystavené spalínám) čerpá ze spaliny do difuzního kanálku (záporný čerpací proud). Při $\lambda = 1$ se nemusí transportovat žádný kyslík. Čerpací proud je proto nulový. Čerpací proud je úměrný koncentraci kyslíku ve spalínách a představuje tak nelineární míru pro součinitele přebytku vzduchu λ (obr. 13). [8]



Obr. 13 Planární element širokopásmové lambda sondy s vyznačeným pohybem iontů [11]



Obr. 14 Závislost čerpacího proudu na součinitelů přebytku vzduch λ [8]

Širokopásmová lambda sonda	
žlutý	= Vyhřívání (-)
modrý	= Vyhřívání (+)
bílý	= I_p (+)
šedý	= V_s (+)
černý	= I_p (-), V_s (-)

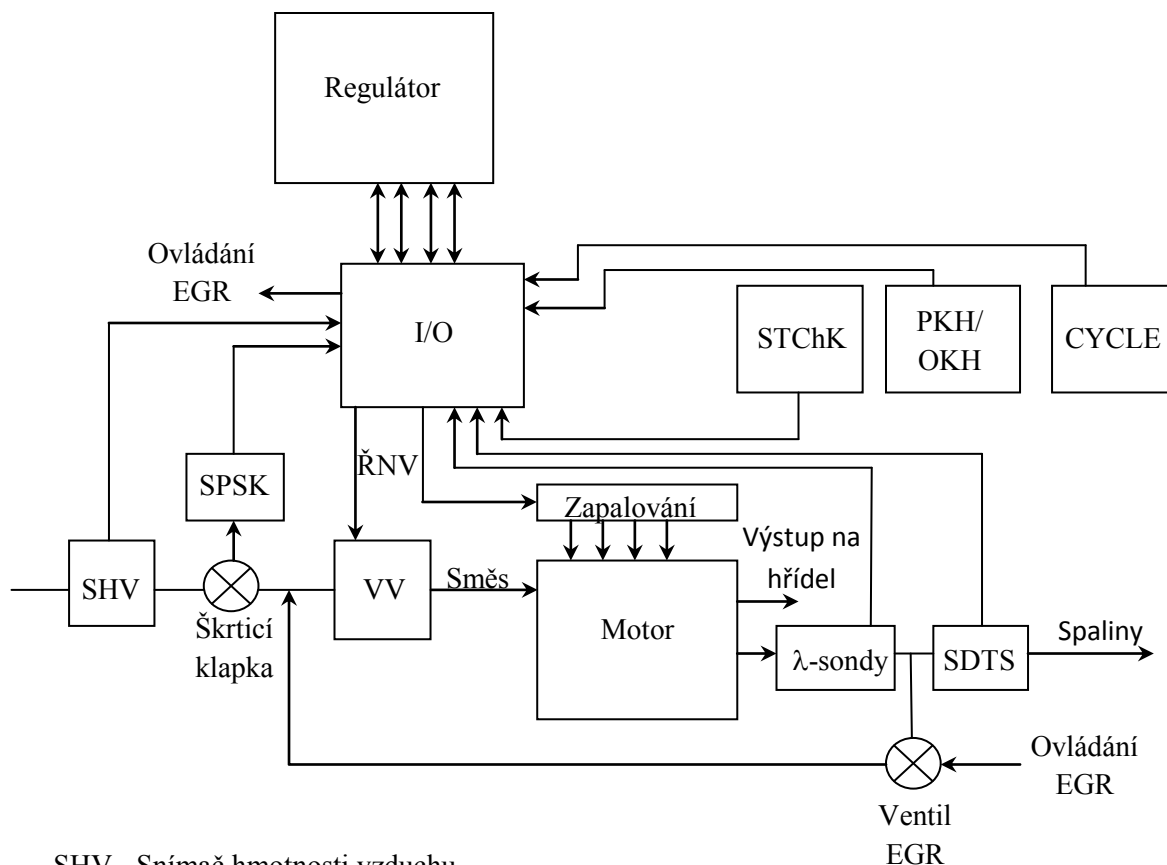
Obr. 15 Barevné rozdělení kabelů u širokopásmové lambda sondy[11]

1.3.Řízení palivové směsi

Pro typický motor máme šest různých módů, které mají vliv na řízení paliva: startování, zahřívání, otevřená regulační smyčka, uzavřená regulační smyčka, prudké zrychlení, decelerace. Program pro režim řídicí logiky určuje mód motoru podle dat ze snímačů a časových údajů uložených v řídicí jednotce. [9]

V dnešních řídicích systémech, je regulátor speciálními digitálními obvody spojen s mikroprocesorem. Typické blokové schéma dnešního řídicího systému je na obrázku 16. Regulátor také obsahuje paměť ROM, obsahující hlavní program (obsahující několik tisíc řádků kódu) a také obsahuje paměť RAM,

pro dočasné uložení dat při zpracování výpočtů. Signály senzorů jsou připojeny k mikroprocesoru přes subsystém vstupů/výstupů (I/O). Podobně systém vstupů/výstupů, poskytuje řídicí signály pro systém vstřikování a spouští impulzy pro systém zapalování. Řídicí systém také obsahuje hardware pro vzorkování a převádění analogového signálu na digitální tak, aby je mohl mikroprocesor zpracovat.[9]



SHV - Snímač hmotnosti vzduchu
 SPSK - Snímač pozice škrticí klapky
 VV - Vstřikovače paliva
 SDTS - Snímač diferenciálního tlaku
 STChK - Snímač teploty chladicí kapaliny
 PKH/OKH - Snímač otáček motoru a pozice klikové hřídele
 ŘNV - Řídicí napětí vstřikovače

Obr. 16 Blokové schéma řídicího systému [9]

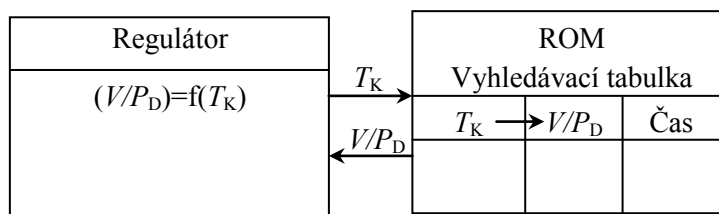
1.3.1. Startování

Při startování motoru, musí regulátor poskytovat poměr vzduch/palivo v rozsahu od 2:1 až po 12:1, v závislosti na teplotě chladicí kapaliny. Správný poměr vzduch/palivo je vybrán s paměti ROM a je funkcí teploty chladicí kapaliny. Nízké teploty ovlivňují dávkování paliva ve správném poměru vzduch/palivo. Při nízkých teplotách inklinuje palivo ve vzduchu do velkých kapek, které se nespálují tak efektivně jako kapky malé. Velké kapičky mají tendenci zvětšovat poměr vzduch/palivo, protože

je použitelná pouze část paliva na povrchu kapky, proto regulátor musí poskytnout menší poměr vzduch/palivo, aby poskytl lépe hořlavou palivovou směs. Během startování je nejdůležitější dosáhnout start motoru, jak nejrychleji je to možné. Jakmile se nastartuje motor, regulátor se přepne do zahřívacího módu. [9]

1.3.2. Zahřívání

Jakmile se motor zahřívá, pořád je nutné dodávat bohatou směs, aby motor běžel bez problémů. Regulátor zůstává v otevřené regulační smyčce, ale poměr vzduch/palivo je neustále závislý na změně teploty chladicí kapaliny. Důraz v tomto režimu je na rychlé a bezproblémové zahřátí. Emise a spotřeba paliva jsou druhořadé. Diagram objasňující správný výběr poměr vzduch/palivo (V/P_D) na základě teploty, je na obrázku 17. V podstatě teplota chladicí kapaliny (T_K) je převedena na adresu vyhledávací tabulky. Tato adresa je dodána do vyhledávací tabulky přes sběrnici systém data bus. Tyto data, uložená na této adrese v ROM paměti, jsou poměr vzduch/palivo (V/P_D) pro danou teplotu. Tyto data jsou poslána do regulátoru přes sběrnici systém data bus. [9]



Obr. 17 Diagram vyhledávací tabulky [9]

Vždy je tu možnost, že snímač teploty chladicí kapaliny selže. Takové selhání by mohlo vyústit v nadměrné obohacování nebo ochuzování směsi, které mohou vážně degradovat výkon motoru a třicestného katalyzátoru. Jedna možnost, jak obejít selhání snímače teploty, je mít časovou funkci pro omezení trvání zahřívacího módu. Známe jmenovitou dobu pro zahřátí motoru při různých teplotách na požadovanou teplotu. Regulátor je nakonfigurován tak, aby přechod z módů zahřívání do otevřené regulační smyčky (zahřátý motor), byl v časovém předstihu prostřednictvím vnitřního časovače. [9]

Metoda pro určení vstřikovaného množství paliva je prakticky stejná ve všech vstřikovacích režimech. Jedná se o obecnou metodu a každý řídicí systém se může poněkud lišit od tohoto. Vstřikované množství paliva je aplikováno během zdvihu kteréhokoliv válce (nazýváme F), to je určeno množstvím vzduchu (V) nasátého do válce (vzduchový příjem), během jeho zdvihu. Množství vstřikovaného paliva spočítáme, když vzduchový příjem podělíme požadovaným poměrem vzduch/palivo:

$$F = \frac{V}{(V/P)_d} \quad (1)$$

Množství vzduchu nasátého do válce, V , je spočítáno z průtoku vzduchu a otáček motoru. Množství

nasátého vzduchu (PV) bude v kg/sec. Otáčky motoru (n_M), jsou uvedeny v otáčkách za minutu, pak počet otáček za sekundu (r) je:

$$r = \frac{n_M}{60} \quad (2)$$

Pak je množství nasátého vzduchu přibližně rozděleno na polovinu válců během jedné otáčky. Pokud je počet válců N , pak vzduchový příjem (hmotnost) během jedné otáčky v každém válci je:

$$V = \frac{PV}{r \cdot \left(\frac{N}{2}\right)} \quad (3)$$

V tomto případě množství dodaného paliva do každého válce je:

$$F = \frac{PV}{r \cdot \left(\frac{N}{2}\right) \cdot (V/P)_d} \quad (4)$$

Tento výpočet probíhá v regulátoru průběžně tak, aby mohlo být množství vstřikování paliva dostatečně rychle přizpůsobeno rychlým provozním změnám v motoru. Doba impulsu, pro vstřikování paliva T , odpovídajícímu množství vstříknutého paliva, je vypočítána za pomoci známého koeficientu pro dodávku paliva R_f (závislý na vstřikovačích).

$$T = \frac{F}{R_f} \quad (5)$$

Tato doba je známa, jako doba základního vstřikovacího impulsu. Skutečná doba impulsu je upravena podle režimu provozu, kdykoliv je potřeba. [9]

1.3.3. Otevřená regulační smyčka

Při zahřátém motoru, bude regulátor pracovat v otevřené regulační smyčce, pokud není z jakéhokoliv důvodu dostupná uzavřená regulační smyčka. Například, motor může být dostatečně zahřán, ale lambda sonda nemusí poskytovat použitelný signál. V každém případě, jakmile je možné, je důležité mít stechiometrickou směs k minimalizaci výfukových plynů. Základní doba vstřikovacího pulzu T_b je počítána tak, jak je uvedeno výše, s tím rozdílem, že poměr vzduch/palivo je nastaven na stechiometrii 14,7:1.

$$T_b = \frac{PV}{r \cdot \left(\frac{N}{2}\right) \cdot (14,7/1) \cdot R_f} \quad (6)$$

Korekce doby vstřikovacího impulsu nastane vždy, když cokoliv ovlivňuje správnost dodávky paliva. Například nízké napětí ovlivňuje tlak v palivovém railu, který dodává palivo do vstřikovačů. Oprava doby vstřikovacího impulsu je pak přepočítána podle skutečného napětí na baterii. [9]

U starších automobilů byla využita metoda pro výpočet hmotnosti nasávaného vzduchu. Nicméně byla velmi složitá a zcela ji u dnešních automobilů nahradil snímač hmotnosti vzduchu. [9]

1.3.4. Uzavřená regulační smyčka

Snad nejdůležitější úpravou doby vstřikovacího impulsu je, když regulátor přejde do uzavřené regulační smyčky. Systém přechází do uzavřené regulační smyčky pouze, když lambda sonda dává použitelný signál, jinak je v otevřené regulační smyčce. V otevřené regulační smyčce je přesná dodávka paliva založena na přesném měření důležitých veličin. Nicméně, každý fyzikální systém je snadno ovlivnitelný změnami pracovních podmínek nebo změnami v čase (stárnutí a opotřebení součástí). Proto v otevřené regulační smyčce nemusí motor fungovat bez problémů. V každém systému řízeném uzavřenou regulační smyčkou jsou výstupní veličiny porovnávány s požadovanými

hodnotami. V případě regulace kvality paliva jsou regulované hodnoty HC, CO a NOx. Protože přímé měření není proveditelné, je dostačující měřit obsah kyslíku ve spalínách. Koncentraci těchto plynů může jednoduše ovládat pomocí stechiometrické směsi. Uzavřená regulační smyčka může fungovat, pouze se zahřátou lambda sondou. Vyhřívané lambda sondy se dostanou do pracovní teploty nejpozději do 30 sekund a nevyhřívaná nejdříve za 1 minutu. Následující popis uzavřené smyčky platí pro dvoubodovou lambda sondu. Napětí z lambda sondy poskytuje zpětnovazební signál pro regulátor kvality paliva. Okamžitá hodnota dvoubodové lambda sondy rychle kolísá od vysoké k nízké hodnotě, ale průměrná hodnota svědčí o použité směsi. Jak bylo popsáno výše, řídicí systém reguluje dodávku paliva podle základní délky vstřiku (T_b) u všech vstřikovačů. Řídicí jednotka motoru průběžně upravuje délku vstřiku pro různé provozní podmínky a parametry. Algoritmus výpočtu n -té doby vstřikovacího impulsu, $T_b(n)$ je dán:

$$T(n) = T_b(n) \cdot [1 + C_L(n)] \quad (7)$$

kde,

$T_b(n)$ je základní doba vstřiku n -tého cyklu určeného podle hmotnosti nasátého vzduchu a poměru vzduch/palivo

$C_L(n)$ je korekční faktor pro uzavřenou regulační smyčku.

Pro otevřenou regulační smyčku je korekční faktor $C_L(n)=0$, pro uzavřenou regulační smyčku:

$$C_L(n) = \alpha I(n) + \beta P(n) \quad (8)$$

kde,

$I(n)$ je integrační část korekce

$P(n)$ je proporcionální část korekce

α a β jsou konstanty

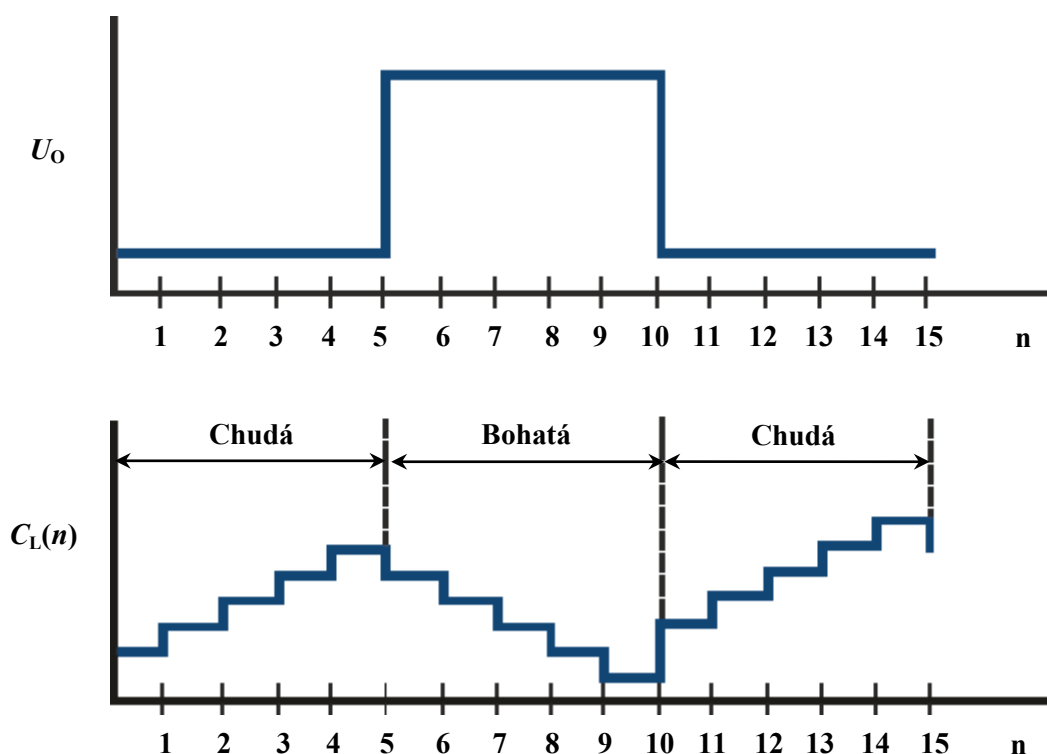
Kdykoliv lambda sonda ukáže bohatou směs (vysoké napětí), potom integrační část korekce pro bohatou směs se spočítá:

$$I(n + 1) = I(n) - 1 \quad (9)$$

Kdykoliv lambda sonda ukáže chudou směs (nízké napětí), potom integrační část korekce pro chudou směs se spočítá:

$$I(n + 1) = I(n) + 1 \quad (10)$$

Výpočet korekčního faktoru pro uzavřenou regulační smyčku pokračuje v přesně určeném časovém cyklu, který volí regulátor. Tento cyklus je dostatečně rychlý na to, aby byla změna doby vstřiku paliva dostatečně rychlá, při prudkém sešlápnutí plynu i ve vysokých otáčkách motoru. Kromě integrační části korekce pro dobu vstřiku je zde i proporcionální část korekce. Proporcionální část korekce je úměrná střední hodnotě napětí lambda sondy, kolem stechiometrické oblasti. Změna korekčního faktoru na základě výpočetního cyklu je znázorněna na obrázku 18. Na tomto grafu jsou znázorněny změny mezi bohatou a chudou směsí skokově. Během relativně chudé směsi se v uzavřené regulační smyčce zvyšuje korekční faktor pro každý výpočetní cyklus, zatím, co během bohaté směsi se korekční faktor snižuje pro každý výpočetní cyklus. Jakmile je výpočet korekčního faktoru pro uzavřenou regulační smyčku dokončen, uloží se na specifické adrese v paměti RAM. Když má být aktivováno vstřikování paliva, při nasávání vzduchu do válce, korekční faktor je vyčten z paměti RAM a základní doba vstřiku je upravena dle tohoto faktoru. [9]



Obr. 18 Úprava korekčního faktoru podle napětí lambda sondy [9]

1.3.5. Prudké zrychlení

Při velkém zatížení motoru nebo při prudké akceleraci, je poměr vzduch/palivo upraven tak, aby poskytl bohatou směs pro největší točivý moment. Při bohaté směsi stoupnou emise a zvětší se spotřeba paliva, proto je tento mód řízení paliva povolen pouze jako dočasný stav. Regulátor si hlídá pomocí snímače natočení škrticí klapky její úhel natočení. Při velkém natočení škrticí klapky je jasné, že řidič vyžaduje prudké zrychlení. Regulátor po dobu, kdy je vyžadováno zvýšení výkonu, prodlouží dobu vstřikovacího impulsu. Toto obohacení umožňuje motoru pracovat s větším točivým momentem, než je povoleno, ale za částečné kontroly emisí a spotřeby paliva. Poměr vzduch/palivo se někdy využívá až do hodnoty 12:1. [9]

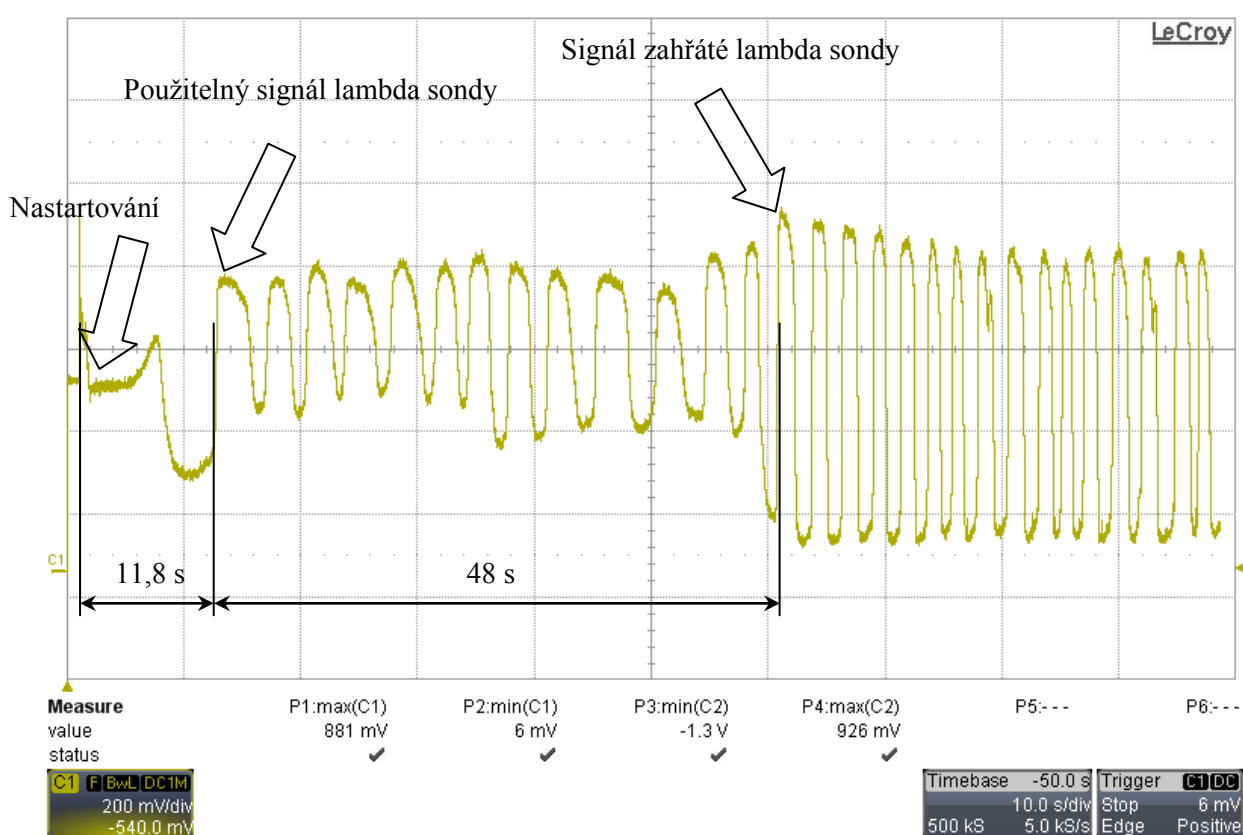
1.3.6. Decelerace

Když je motor lehce zatížen a má vysoké otáčky, jako při doběhu a zpomalování, motor pracuje s velmi chudou směsí, aby nedocházelo ke zvýšení emisí HC a CO. Decelerace je indikována náhlým snížením úhlu natočení škrticí klapky nebo jejím uzavřením. Regulátor sníží dobu impulsu pro vstřikování paliva nebo při velké deceleraci vstřikování úplně vypne. [9]

2. Měření pro analýzu lambda regulace

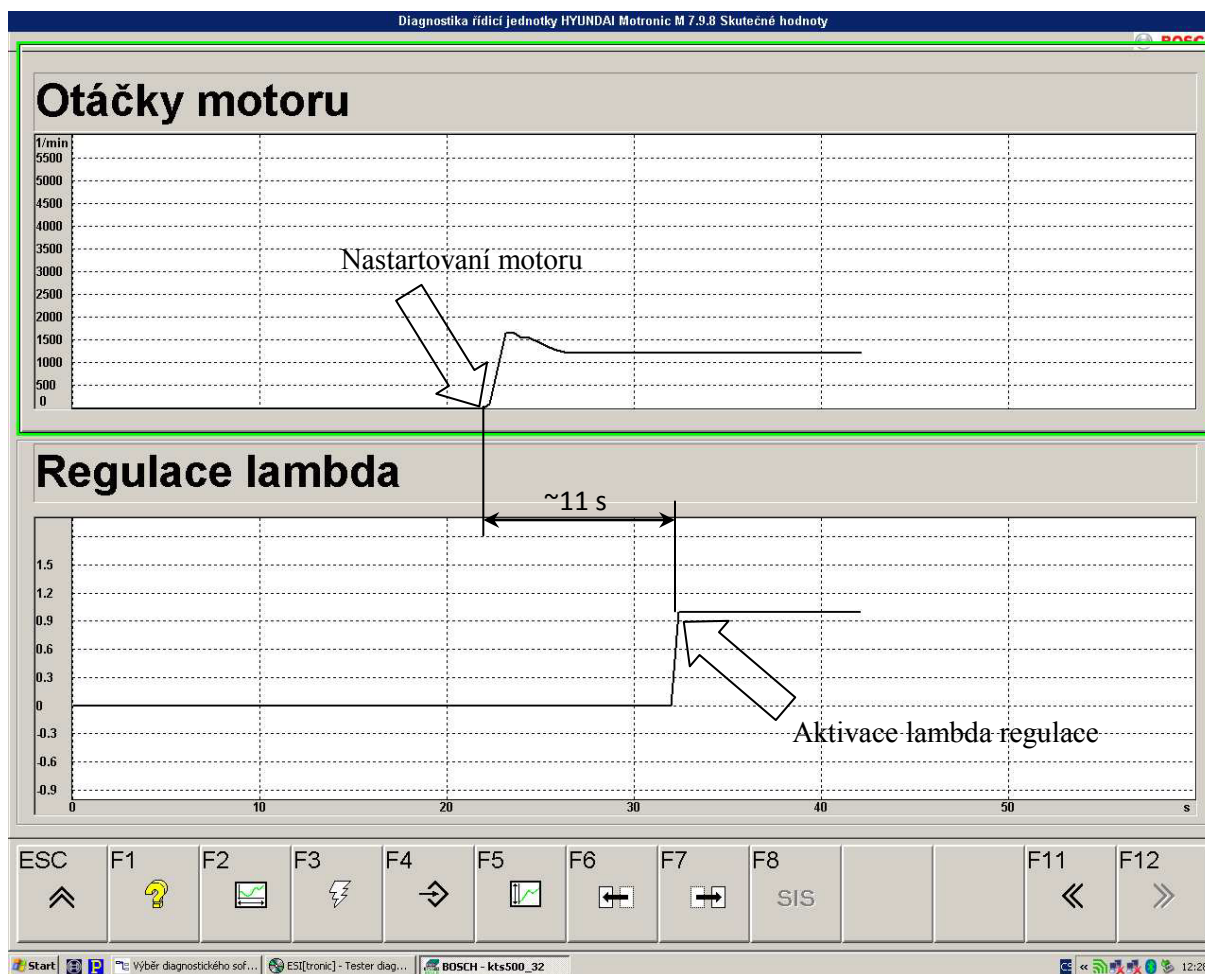
2.1. Průběh nezahřáté lambda sondy

Pro měření byl použit automobil Hyundai i30, který má dvě vyhřívané dvoubodové lambda sondy a třicetý katalyzátor. Měření na lambda sondách se provádí tak, že se přes terminál přepojuje na první kanál osciloskopu, lambda sonda před katalyzátorem. Seriová diagnostika se používá pro určení času, kdy se aktivuje lambda regulace. Motor je studený.



Obr. 19 Napětí lambda sondy při studeném startu

Lambda sonda začíná podávat použitelný signál přibližně po 11 sekundách. Při této teplotě lambda sondy, není ještě její přechod mezi bohatou a chudou směsí dostatečně dynamický. Nicméně je dostatečný pro aktivaci lambda regulace (uzavřené regulační smyčky). Po dalších 48 sekundách se nám lambda sonda nahřeje na teplotu asi 800 °C a její dynamika se zrychlí. Díky zrychlení její dynamiky je možné korigovat směs rychleji a přesněji. Na obrázku 20 je viditelné zapnutí lambda regulace. Toto měření potvrzuje, že jakmile začne lambda sonda podávat použitelný signál, tak se tato regulace aktivuje. V tomto případě sice lambda sonda není plně zahřátá, ale tento signál postačí, aby bylo schopno korigovat palivo okolo stecheometrie a snížit tak emise a spotřebu paliva.



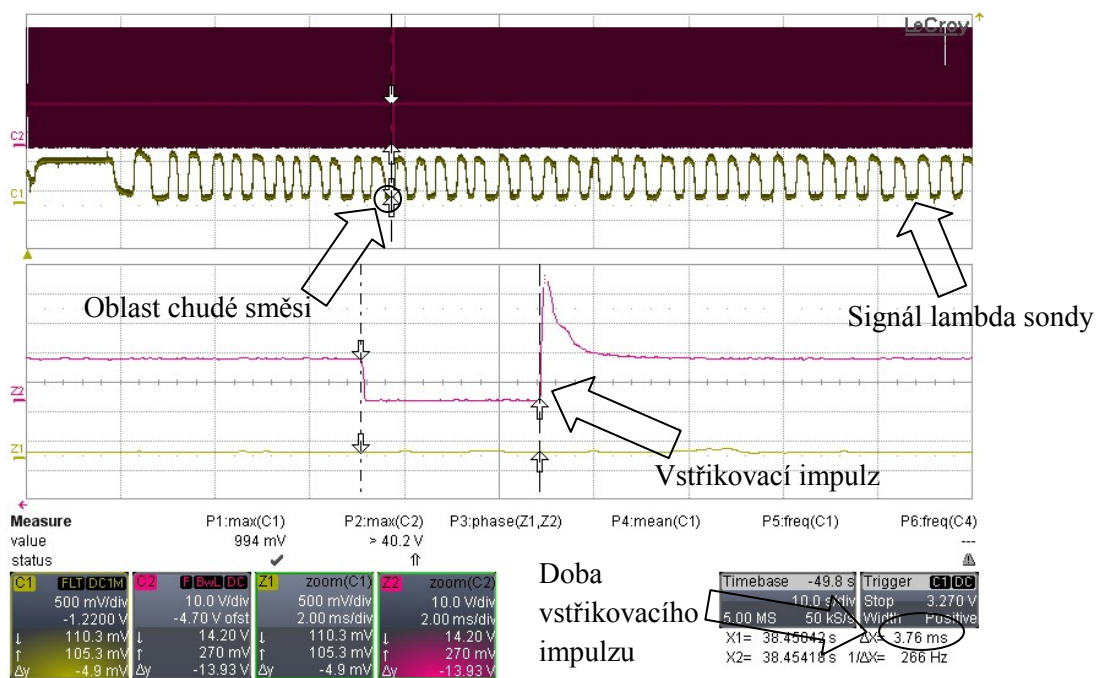
Obr. 20 Aktivace lambda regulace

2.2.Ovlivnění vstřiku lambda sondou

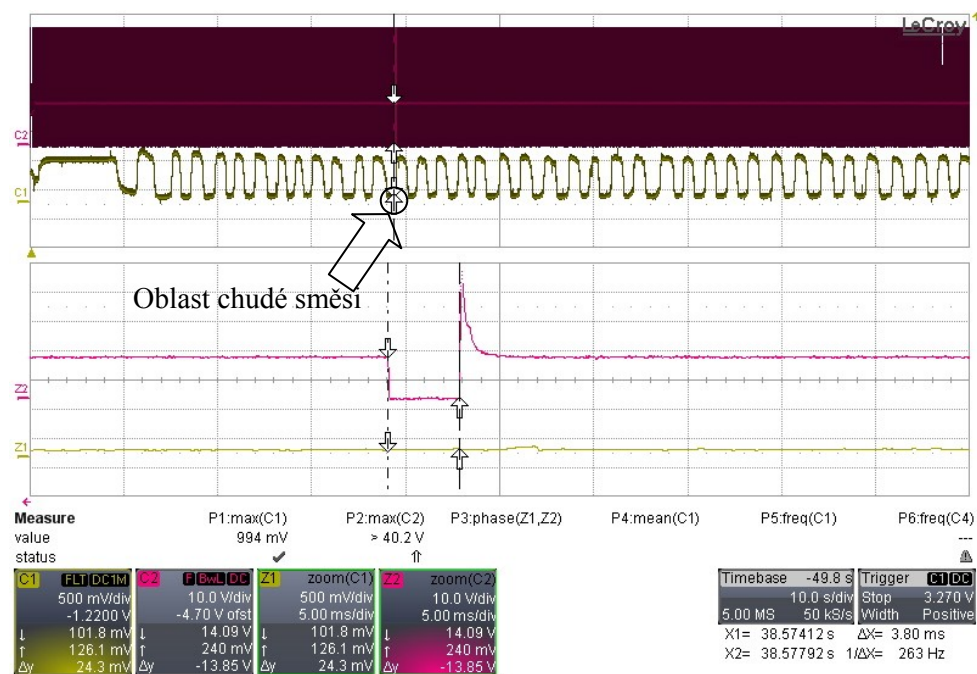
Vzhledem k tomu, že osciloskop má společné země pro všechny kanály, musí se použít diferenciální sonda, protože vstřikovač a lambda sonda mají odlišnou zemi. Lambda sondu připojíme přes standardní sondu, vstřikovač přes diferenciální sondu a minus pól přivedeme z baterie. První měření probíhá, při připojené lambda sondě před katalyzátorem a druhé měření je odpojená, lambda sonda před katalyzátorem. Odpojená lambda sonda simuluje její poruchu.

2.2.1. Připojení lambda sondy před katalyzátorem

Studený motor - volnoběh:

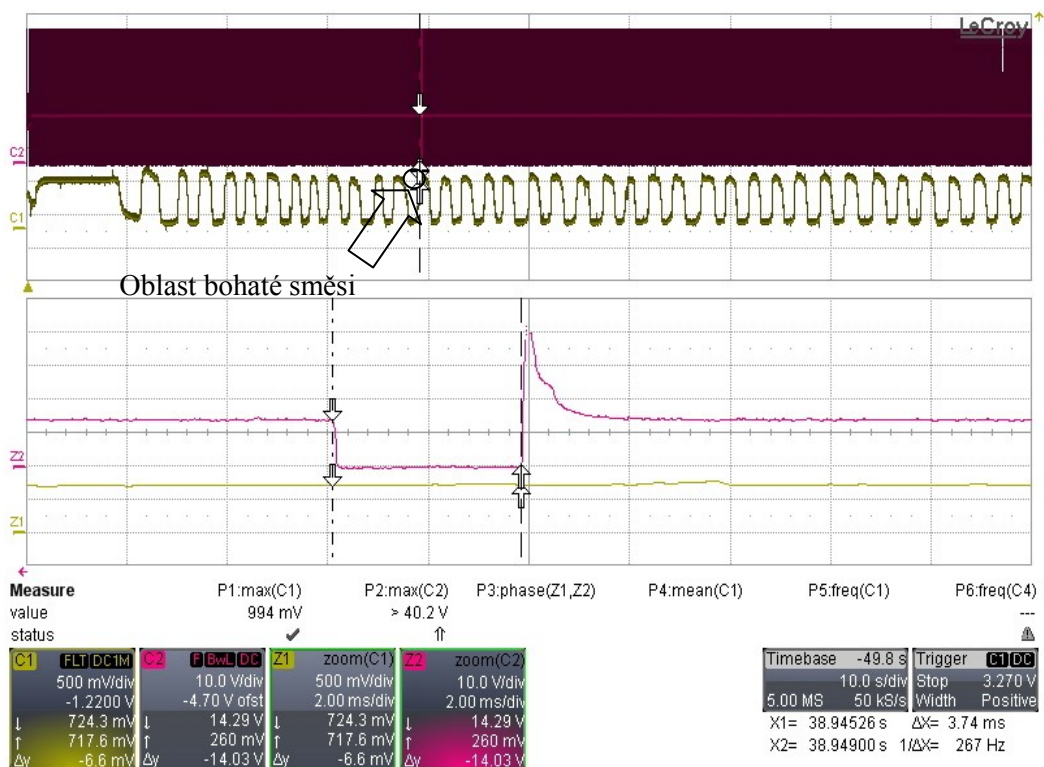


Obr. 21 Signál lambda sondy a vstřikovací impulzy



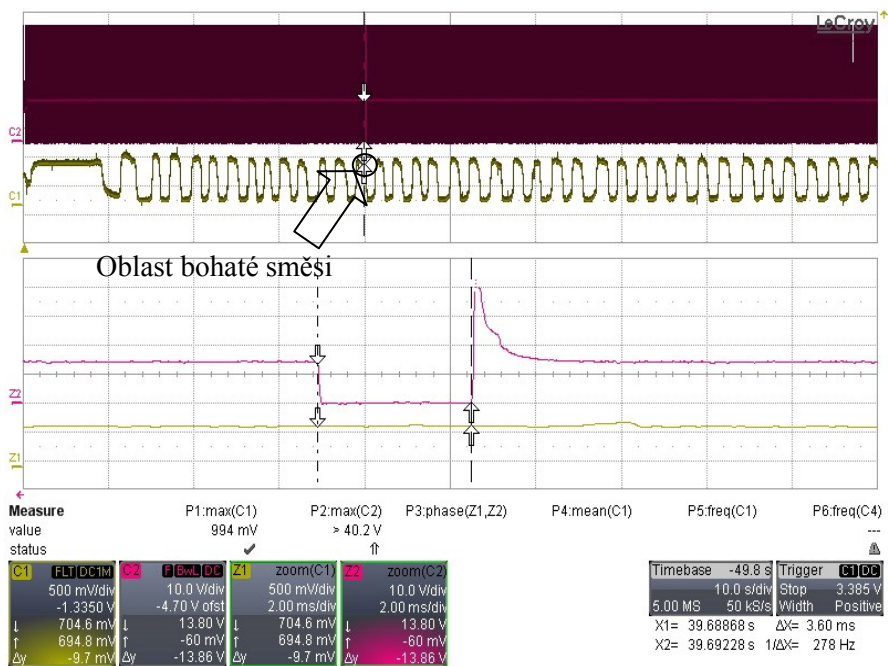
Obr. 22 Signál lambda sondy a vstřikovací impulzy

Jakmile signál lambda sondy ukáže chudou směs, regulátor okamžitě začne obohacovat směs tak, aby se dostal zpátky do oblasti bohaté směsi. Obohacování je znázorněno na obrázcích 21 a 22, kde se zvětšuje doba vstřikovacího impulsu v oblasti chudé směsi.



Obr. 23 Signál lambda sondy a vstřikovací impulzy

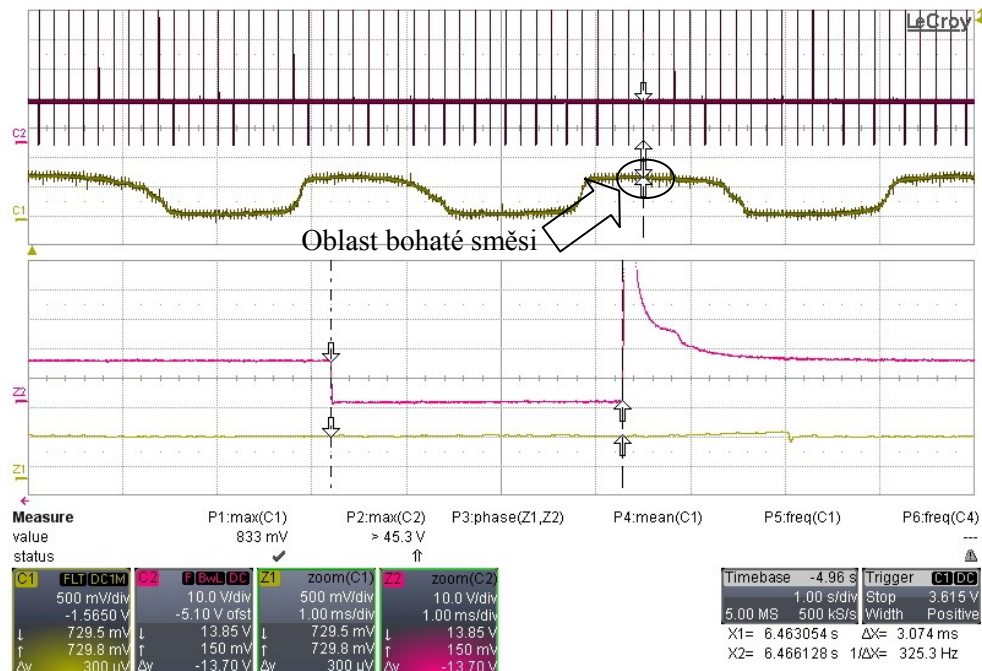
Když lambda sonda ukáže bohatou směs, regulátor začne ochuzovat směs tak, že se dostává zpět do oblasti chudé směsi. Ochuzování je znázorněno na obrázcích 23 a 24, kde se zmenšuje doba vstřikovacího impulzu v oblasti bohaté směsi. Toto obohacování a ochuzování probíhá kontinuálně.



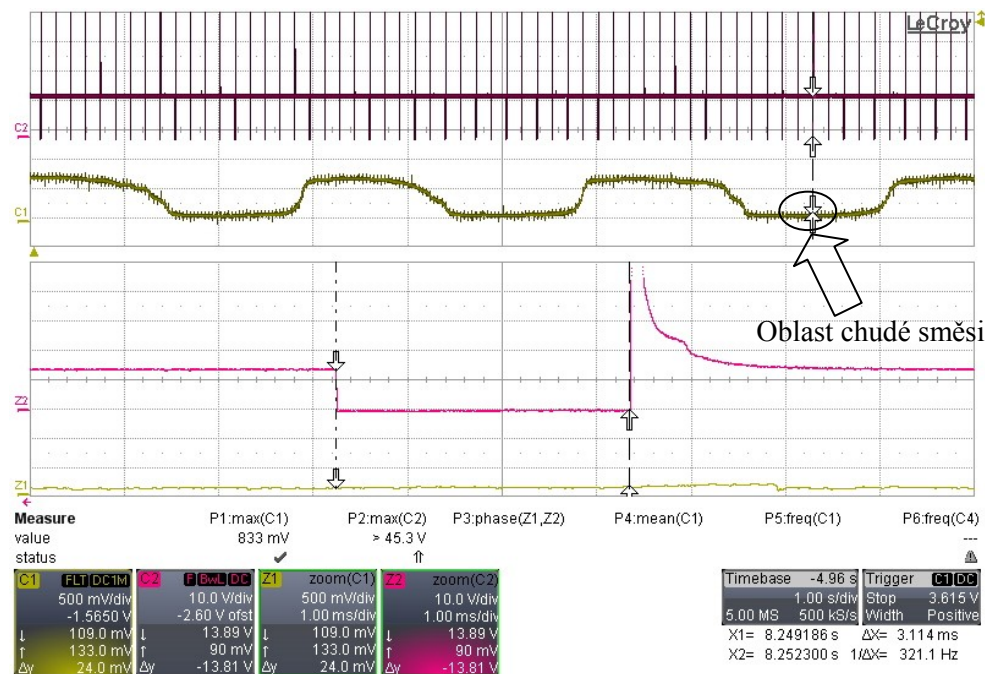
Obr. 24 Signál lambda sondy a vstřikovací impulzy

Zahřátý motor - volnoběh:

Platí zde naprosto stejné pravidlo, jako u předchozího měření, jenom s tím rozdílem, že délky vstřiku jsou kratší.

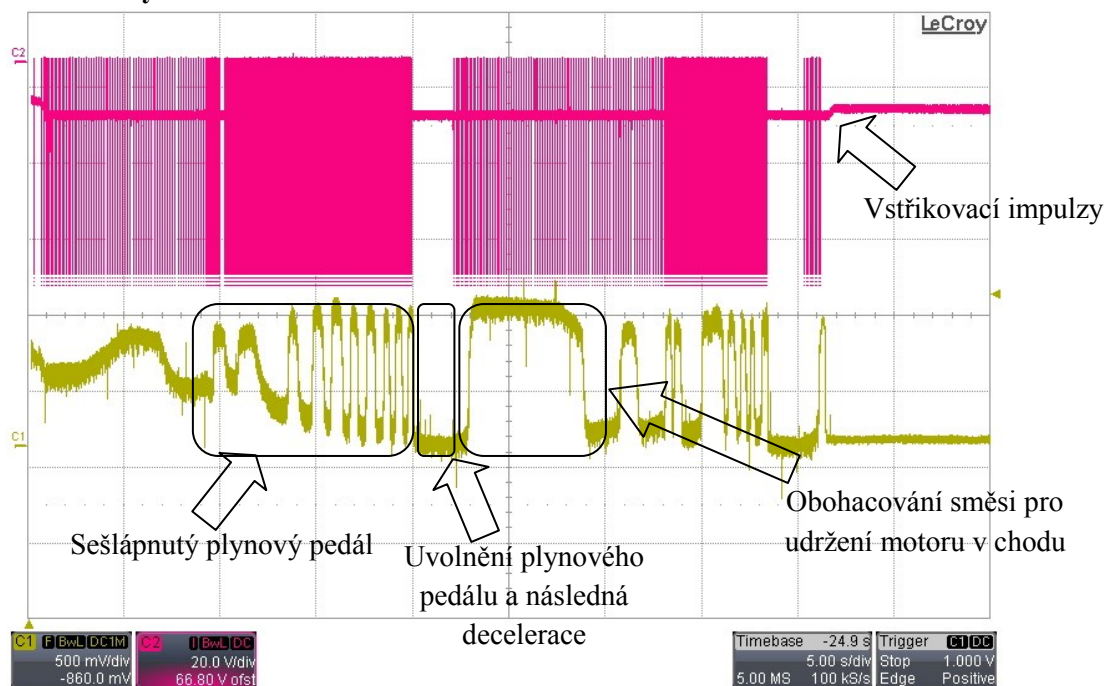


Obr. 25 Signál lambda sondy a vstřikovací impulzy



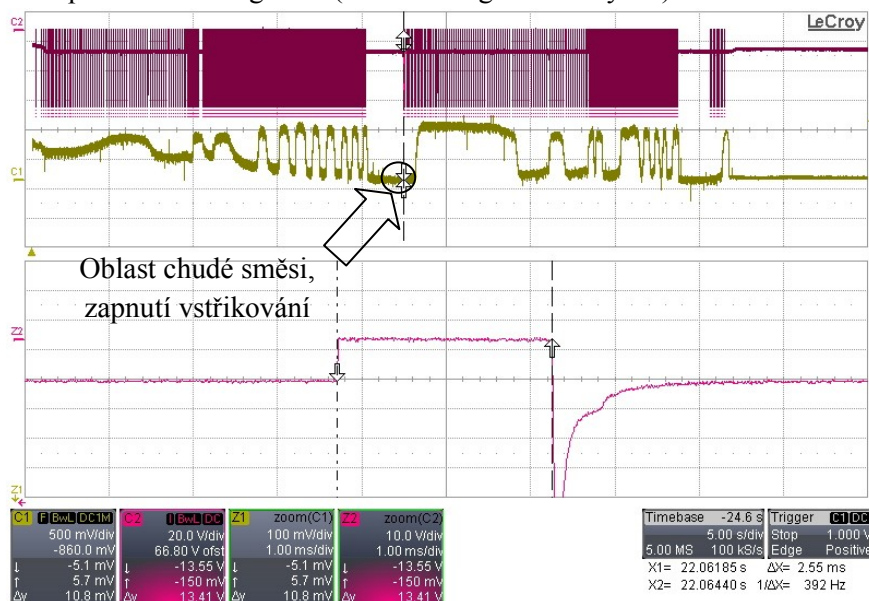
Obr. 26 Signál lambda sondy a vstřikovací impulzy

Zahřátý motor – zvýšení otáček:

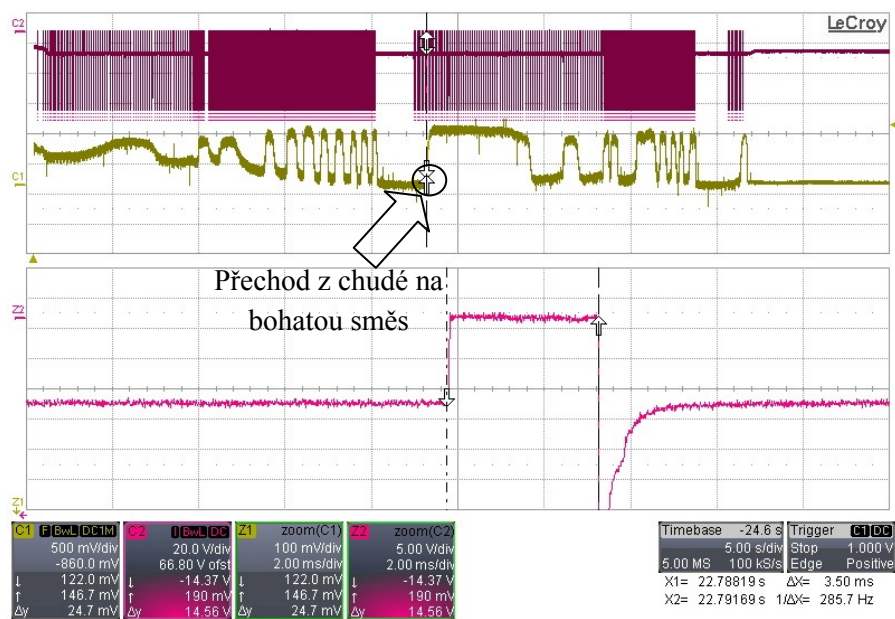


Obr. 27 Signál lambda sonda a vstřikovací impulzy

Při sešlápnutí plynového pedálu se nám začne zkracovat doba vstřikovacího impulsu, ochuzování a obohacování směsi probíhá rychleji a na signálu lambda sondy se to projeví jejím rychlejším kmitáním. Po uvolnění pedálu nastává decelerace, vstřikování je vypnuto. Lambda sonda v tuto chvíli udává chudou směs. Jakmile motor dosáhne do určitých otáček, vstřikování se opět zapne. Následuje obohacování směsi pro udržení motoru v chodu. S naměřených vstřikovacích impulsů je vidět, že nejprve se použije kratšího impulsu, který je následně obohacován. Po relativně dlouhém obohacování směsi se opětovně spustí lambda regulace (uzavřená regulační smyčka) a nastává ochuzování paliva.

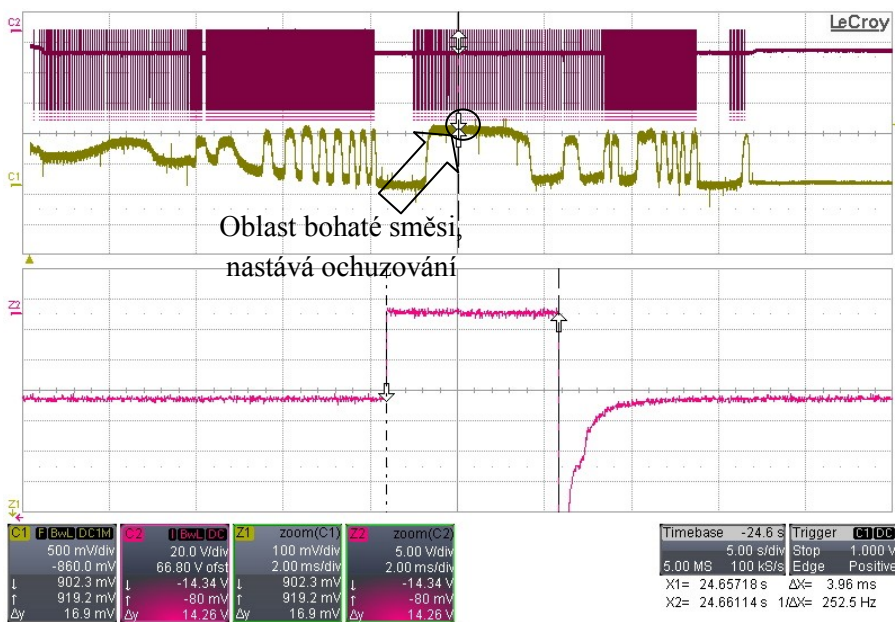


Obr. 28 Signál lambda sondy a vstřikovací impulzy



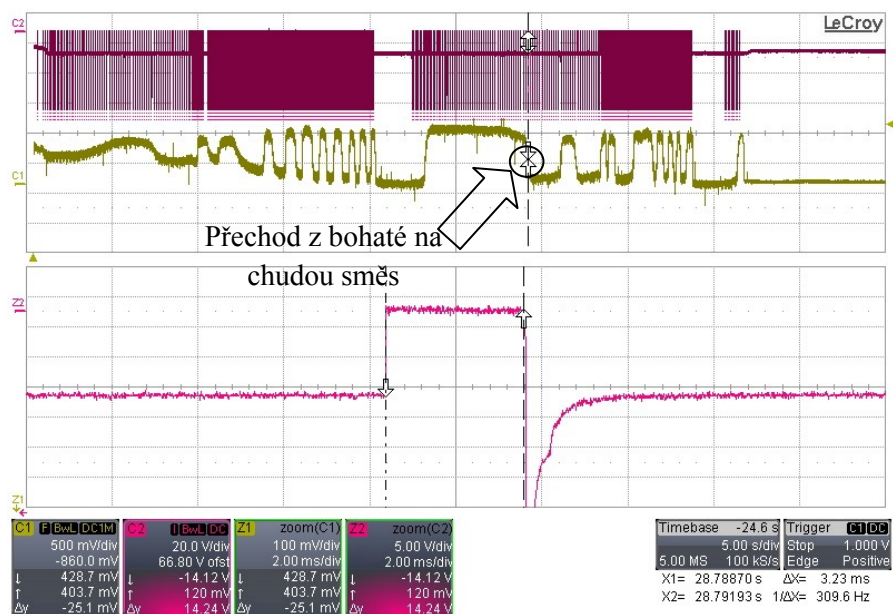
Obr. 29 Signál lambda sondy a vstřikovací impulzy

Na obrázku 29 je jasně viditelné velké obohacení, oproti prvním vstřikovacím impulzům.



Obr. 30 Signál lambda sondy a vstřikovací impulzy

Tento vstřikovací impuls je poslední, kde došlo k obohacení, následující vstřikovací impulzy se zkracují (ochuzování směsi).



Obr. 31 Signál lambda sondy a vstřikovací impulzy

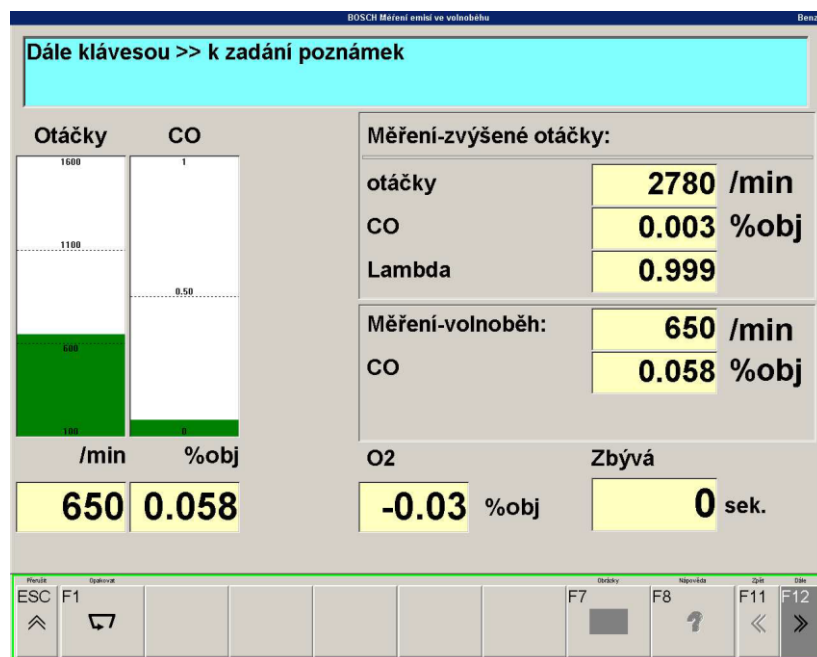
Lambda regulace je opět aktivní a dochází k velkému ochuzování směsi.

Kontrola emisí:

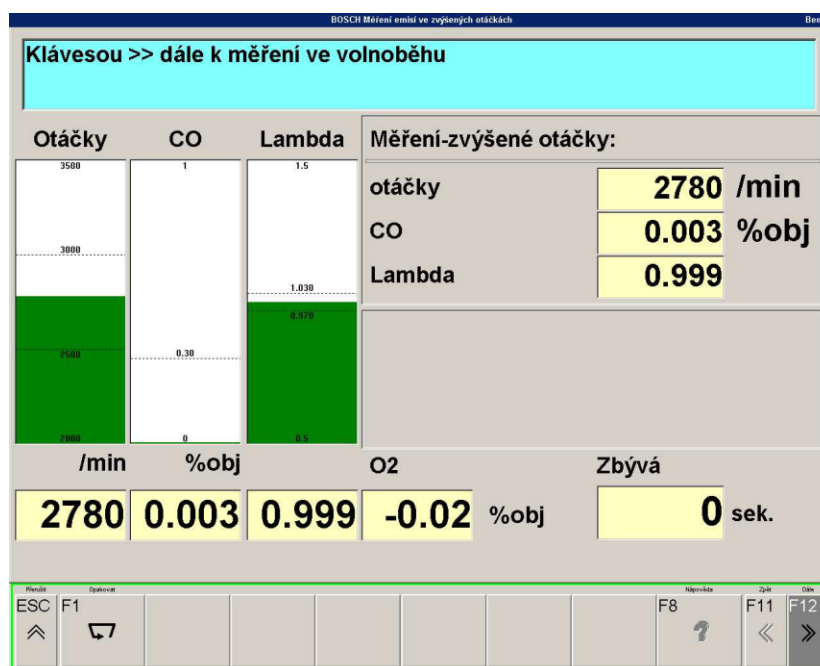
Při zapojení lambda sondy, nemají být zvýšené emise. Ověření se provádí pomocí analyzátoru emisí. Automobil prochází emisní kontrolou naprosto bez problémů. To dokládá jak protokol o měření, tak následující dva obrázky z měření za volnoběhu a ve zvýšených otáčkách. Všechny měřené hodnoty jsou v pořádku.

MĚŘENÉ PARAMETRY		PŘEDEPSANÉ		NAMĚŘENÉ S PALIVEM		VÝSLEDEK
		min.	max.	ZÁKLADNÍM	/ ALTERNATIVNÍM	
Teplota oleje	[°C]	Alternativní příprava		#		O.K.
PŘI VOLNOBĚHU:						
Otáčky	[/min]	600	1100	650		O.K.
Obsah CO	[%obj]		0.5	0.058		O.K.
Obsah HC	[ppm]			17		
Obsah CO2	[%obj]			14.74		
Obsah O2	[%obj]			-0.03		
Lambda	[-]			0.996		
PŘI ZVÝŠENÝCH OTÁČKÁCH:						
Otáčky	[/min]	2500	3000	2780		O.K.
Obsah CO	[%obj]		0.3	0.003		O.K.
Obsah HC	[ppm]			8		
Obsah CO2	[%obj]			14.78		
Obsah O2	[%obj]			-0.02		
Lambda	[-]	0.97	1.03	0.999		O.K.

Obr. 32 Protokol o měření emisí



Obr. 33 Analýza emisí - volnoběh

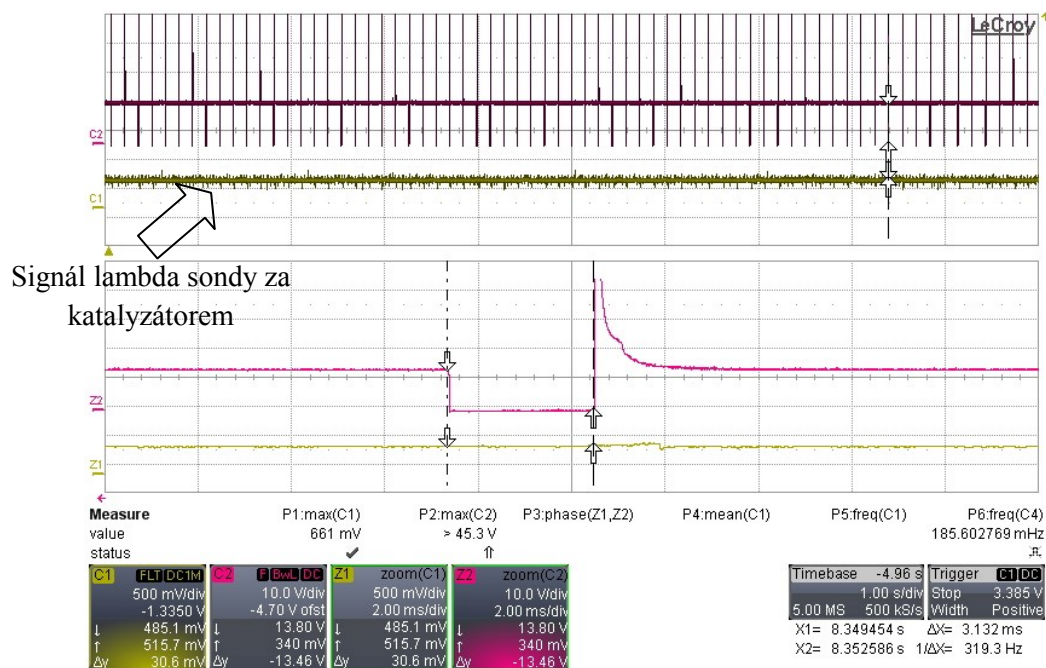


Obr. 34 Analýza emisí - zvýšené otáčky

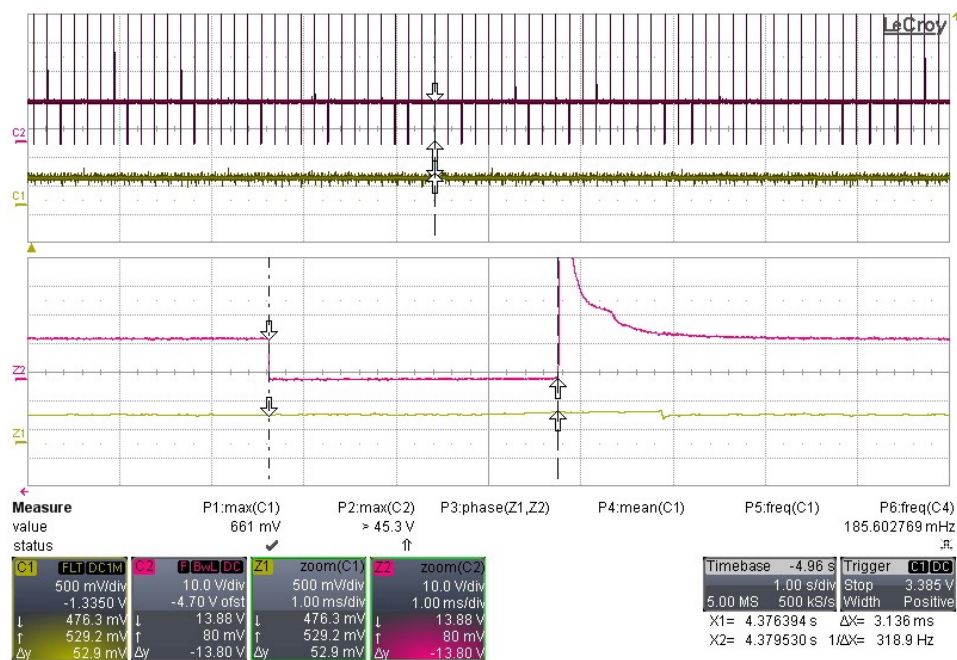
2.2.2. Odpojení lambda sondy před katalyzátorem

Volnoběh:

V tomto případě je lambda sonda před katalyzátorem odpojena od řídicí jednotky. Na první kanál osciloskopu je připojena lambda sonda za katalyzátorem.



Obr. 35 Signál lambda sondy a vstřikovací impulzy



Obr. 36 Signál lambda sondy a vstřikovací impulzy

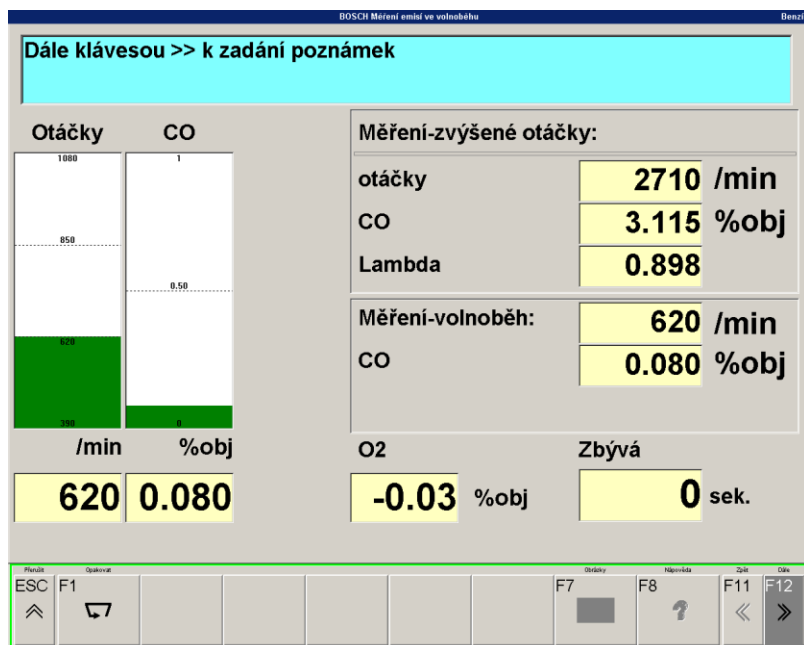
Na obrazcích je jasně viditelné, že neprobíhá žádná korekce směsi. Délka vstřikovacích impulzů se téměř neliší. To znamená, že regulátor nedostává použitelný signál z lambda sondy a přepíná se do otevřené regulační smyčky. Lambda sonda za katalyzátorem poskytuje konstantní signál o napětí 450 mV, při volnoběžných otáčkách. Katalyzátor v tomto případě funguje správně a emise se nezvyšují. Tento fakt dokládá i měření na emisním analyzátoru. Jak je vidět na obrázku, CO jsou stále v

přípustné hodnotě. Při zvýšených otáčkách se nám zvýší emise CO, a ani součinitel přebytku vzduchu se nenachází v povolené mezí. Přesná čísla se nacházejí v protokolu o měření emisí. Ze součinitele přebytku vzduchu je patrné, že při odpojené lambda sondě se řídicí jednotka snaží udržet směs na stechiometrii, nicméně už při volnoběžných otáčkách dodává mírně bohatou směs a při zvýšených otáčkách je tato směs příliš bohatá na to, aby katalyzátor fungoval správně, proto jsou zde zvýšené emise CO, nad povolenou mez, a automobil neprojde emisní kontrolou.

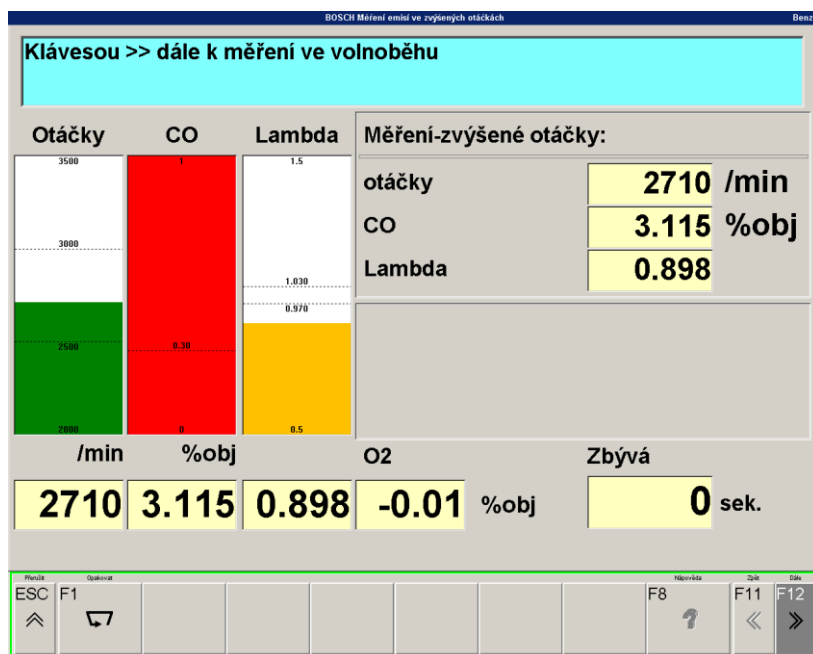
Kontrola emisí:

MĚŘENÉ PARAMETRY		PŘEDEPSANÉ		NAMĚŘENÉ S PALIVEM		VÝSLEDEK
		min.	max.	ZÁKLADNÍM	/ ALTERNATIVNÍM	
Teplota oleje	[°C]	Alternativní příprava		#		O.K.
PŘI VOLNOBĚHU:						
Otáčky	[/min]	620	850	620		O.K.
Obsah CO	[%obj]		0.5	0.080		O.K.
Obsah HC	[ppm]			22		
Obsah CO2	[%obj]			15.06		
Obsah O2	[%obj]			-0.03		
Lambda	[-]			0.995		
PŘI ZVÝŠENÝCH OTÁČKÁCH:						
Otáčky	[/min]	2500	3000	2710		O.K.
Obsah CO	[%obj]		0.30	3.115		n.O.K.
Obsah HC	[ppm]			312		
Obsah CO2	[%obj]			13.04		
Obsah O2	[%obj]			-0.01		
Lambda	[-]	0.97	1.03	0.898		n.O.K.

Obr. 37 Protokol o měření emisí



Obr. 38 Analýza emisí - volnoběh



Obr. 39 Analýza emisí - zvýšené otáčky

3. Závěr

Cílem této bakalářské práce je teoretické popsání lambda regulace u zážehových spalovacích motorů a teoretické znalosti ověření měření na automobilech a posléze vyhodnocení tohoto měření. Tento cíl se mi podařilo splnit, jak popisem jednotlivých druhů lambda sondy, tak popisem řízení palivové směsi. Měřením jsem si ověřil teoreticky nabyté informace a také jsem zpracoval protokol o měření, který by měl pomoci s pochopením lambda regulace a s její diagnostikou.

Vypracováním této bakalářské práce jsem získal tyto znalosti: v oblasti lambda sond a jejich použití v systému řízení palivové směsi, vliv lambda regulace na složení směsi a vliv součinitelů přebytku vzduchu na funkci katalyzátoru. Získané teoretické vědomosti jsem si ověřil praktickým měřením na vozidle. Díky tomuto měření jsem schopen ovládat jak sériovou, tak paralelní diagnostiku a systém analýzy emisí. Tyto praktické znalosti jsem schopen použít pro ověření funkce katalyzátoru, lambda sondy a také, jestli korekce směsi probíhá správně.

4. Seznam použité literatury:

- [1] ngk.de [online]. 2011 [cit. 2011-04-22]. Požadavky pro lambda sondy. Dostupné z WWW: <<http://www.ngk.de/en/products-technologies/lambda-sensors/requirements/>>.
- [2] O2 sensors 2001 [cit. 2011-04-22]. Dostupné z WWW: <<http://www.turbobricks.com/resources/O2sensors.pdf>>.
- [3] Autoelektrika.cz [online]. 2010 [cit. 2011-04-22]. Lambda sondy. Dostupné z WWW: <<http://www.autoelektrika.cz/clanky-38/Lambda-sondy-.aspx>>.
- [4] ngk.de [online]. 2011 [cit. 2011-04-22]. E-learning. Dostupné z WWW: <<http://www.ngk-elearning.com/>>.
- [5] ngk.de [online]. 2011 [cit. 2011-04-22]. Zirconium dioxide lambda sensor. Dostupné z WWW: <<http://www.ngk.de/en/products-technologies/lambda-sensors/lambda-sensor-technologies/zirconium-dioxide-lambda-sensor/>>.
- [6] Bosch-lambdasonde.de [online]. 2010 [cit. 2011-04-22]. Function. Dostupné z WWW: <http://www.bosch-lambdasonde.de/en/lambdasonde_funktion.htm>.
- [7] ngk.de [online]. 2011 [cit. 2011-04-22]. Design of a Zirconium dioxide lambda sensor. Dostupné z WWW: <<http://www.ngk.de/en/technology-in-detail/lambda-sensors/design-of-lambda-sensors/design-of-a-zirconium-dioxide-lambda-sensor/>>.
- [8] BOSCH technické brožury, žluté sešity 1996-2009
- [9] RIBBENS, B., W.: Understanding Automotive Electronics, Sixth Edition, USA 2003, Elsevier Science, 481 str., ISBN 0-7506-7599-3
- [10] ngk.de [online]. 2011 [cit. 2011-04-22]. Design of a Broadband lambda sensor. Dostupné z WWW: <<http://www.ngk.de/en/technology-in-detail/lambda-sensors/design-of-lambda-sensors/design-of-a-broadband-lambda-sensor/>>.
- [11] ngk.de [online]. 2011 [cit. 2011-04-22]. Broadband lambda sensor. Dostupné z WWW: <<http://www.ngk.de/en/products-technologies/lambda-sensors/lambda-sensor-technologies/broadband-lambda-sensor/>>.

5. Seznam příloh

Příloha A:	Laboratorní úloha pro pochopení funkce lambda regulace
Příloha B:	Terminál pro měření
Příloha C:	Bosch FSA 740 (sériová diagnostika)
Příloha D:	Osciloskop LECROY WAVERUNNER 44Xi-A
Příloha E:	Diferenciální sonda LeCroy ADP305
Příloha F:	Měření na automobilu Hyundai i30
Příloha G:	Konektory lambda sond